

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний гірничий університет

О.С.Бешта, О.В. Балахонцев, В.А. Бородай

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД У ПРОКАТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Дніпропетровськ · 2010

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
I. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА	6
1.1. Технологічний процес металургійного виробництва	6
1.2. Прокатне виробництво та класифікація прокатних станів	6
1.3. Механічне обладнання прокатних станів	10
1.4. Електричне обладнання прокатних станів	13
1.5. Основи теорії прокатки	19
1.6. Визначення моменту прокатки і моменту на валу двигуна	23
<i>Контрольні запитання</i>	32
II. ТЕХНОЛОГІЯ ПРОКАТКИ І ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРОПРИВОДА	35
2.1. Реверсивні стани гарячої прокатки	35
2.2. Особливості неперервної прокатки	42
2.3. Неперервні стани гарячої прокатки	47
2.4. Стани холодної прокатки	55
2.5. Допоміжні механізми прокатних станів	60
<i>Контрольні запитання</i>	73
III. РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ	75
3.1. Регулювання струму у нереверсивних вентильних електроприводах	75
3.2. Способи адаптації до режиму переривистого струму	79
3.3. Особливості регулювання струму в реверсивних вентильних електроприводах	92
3.4. Особливості регулювання струму в багатомостових електроприводах	93
3.5. Регулювання струму у системі електропривода "генератор-двигун"	97
<i>Контрольні запитання</i>	99
IV. РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ, ЕРС Й ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	100
4.1. Регулювання кутової швидкості	100
4.2. Регулювання ЕРС або напруги	107
4.3. Керування полем двигуна	113
4.4. Вирівнювання навантаження у багатодвигунових електроприводах	119
4.5. Регулювання параметрів режиму у системі електропривода "генератор-двигун"	130
<i>Контрольні запитання</i>	132
V. РЕГУЛЮВАННЯ ПОЛОЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	134
5.1. Точна зупинка електропривода	134
5.2. Автоматичне регулювання положення за відхиленням	136

5.3. Параболічний регулятор положення	138
5.4. Системи електричної синхронізації	142
<i>Контрольні запитання</i>	151
VI. ЕЛЕКТРОПРИВОД З РЕГУЛЮВАННЯМ НАТЯГУ	152
6.1. Принципи регулювання натягу	152
6.2. Моменти на валу електропривода натяжних механізмів	154
6.3. Система регулювання натягу й швидкості натяжних механізмів	157
6.4. Однозонна система регулювання натягу	159
6.5. Однозонна система регулювання натягу при змінному потоку	161
6.6. Двохзонна система регулювання натягу (комбінована)	164
<i>Контрольні запитання</i>	166
VII. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОКАТНИХ СТАНІВ	167
7.1. Задачі автоматизації	167
7.2. Теоретичні принципи регулювання товщини металу при гарячій прокатці	168
7.3. САРТ і Н неперервних станів гарячої прокатки	173
7.4. Теоретичні принципи регулювання товщини металу при холодній прокатці	177
7.5. САРТ і Н неперервних станів холодної прокатки	180
<i>Контрольні запитання</i>	186
VIII. ЕЛЕКТРОПРИВОД ПРОКАТНИХ СТАНІВ	188
8.1. Реверсивні стани гарячої прокатки	188
8.2. Неперервні стани гарячої прокатки	192
8.3. Реверсивні стани холодної прокатки	195
8.4. Неперервні стани холодної прокатки	198
<i>Контрольні запитання</i>	199
ДОДАТКИ	200
А. Обробка металу тиском	200
В. Блюмінг 1150 Дніпровського металургійного комбінату	209
С. Неперервний стан 250 Єнакіївського металургійного заводу	213
D. Методика вибору двигунів головного привода неперервного стана холодної прокатки листа	220
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	224

ПЕРЕДМОВА

Серед різних методів пластичної обробки металу прокатка займає особливе місце, тому що такий процес дозволяє отримати продукцію необхідної форми і розмірів для безпосереднього використання, а також покращити її механічні і інші властивості.

Якість готової металургійної продукції суттєво залежить від роботи електропривода металургійних агрегатів. Електропривод прокатного виробництва є одним із основних користувачів електричної енергії у металургійному процесі. Потужність окремих металургійних установок сягає десятків мегават встановленої потужності. Більшість електроприводів металургійного виробництва є унікальними і працюють у специфічних умовах.

Ці та інші причини примушують особливу увагу звертати на металургійний електропривод.

Широка різноманітність металургійних електроприводів і обмежений обсяг дисципліни навчальної програми майбутнього інженера-електромеханіка не дозволяють розглянути увесь спектр питань, пов'язаних із металургійними електроприводами і примушують розглядати лише питання електропривода у прокатному виробництві.

Саме з цих причин у посібнику не розглядається головний електропривод прокатних станів змінного струму, хоча на сьогоднішній день такі окремі унікальні електроприводи уже працюють в Україні.

Посібник присвячений найбільш поширеному в прокатному виробництві України електроприводу постійного струму, який через низку технічних і економічних проблем ще довго буде використовуватись на металургійних підприємствах.

Навчальний посібник побудований за принципом "від загального – до конкретного".

Спочатку розглядаються загальні питання технологічного процесу прокатки, принципи вибору двигуна, системи живлення, системи керування.

Далі розглядаються принципи синтезу систем керування основними параметрами електропривода, враховуючи особливості металургійного процесу прокатки.

Значна увага у посібнику приділяється автоматизації і створенню автоматизованих систем управління технологічним процесом на базі електроприводів.

Головною метою книги є навчити студента системному підходу до електропривода, взагалі, і електропривода у прокатному виробництві, зокрема, залучити до технічної творчості і самостійної роботи, стимулювати бажання навчатися цікавій спеціальності електромеханіка впродовж всього життя.



ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1. Технологічний процес металургійного виробництва

Увесь металургійний процес можна розділити на три етапи: 1) виробництво чавуна; 2) виробництво сталі; 3) виробництво прокату (рис.1.1).

Для виробництва чавуна необхідна руда, вугілля та інші додаткові матеріали. Руда добувається в кар'єрах (відкрита розробка корисних копалин), або в рудниках (підземна розробка корисних копалин). Попередньо оброблена на рудозбагачувальній фабриці (РЗФ), вона доставляється в доменну піч у вигляді агломерату.

Кам'яне вугілля добувається у вугільних шахтах. Після обробки його в коксових печах отримують кокс, який використовується в доменних печах як паливо.

Чавун, що виплавляється у доменних печах, доставляється у сталеплавильний цех для отримання сталі. Сталь у вигляді злитків транспортується в прокатні цехи для виробництва прокатної продукції. За іншою технологією рідка сталь транспортується у спеціальній пристрій для неперервної розливи сталі (ПНРС). Останнім етапом є прокатне виробництво.

1.2. Прокатне виробництво та класифікація прокатних станів

На металургійному заводі завершується у прокатних цехах цикл виробництва. Прокатний цех має, як зазвичай, декілька прокатних станів, кожний з яких прокатує метал певних розмірів та профілів.

Основним призначенням усякого прокатного стану є здійснення пластичної деформації металу між валками, що обертаються. Обладнання прокатного стану, яке слугує безпосередньо для деформації металу, називається *основним обладнанням*. До нього відносяться кліті з прокатними валками, приводний двигун валків (або декілька двигунів за кількістю валків), редуктори, шестеренні кліті. Усе залишкове обладнання, яке необхідне для здійснення технологічного процесу прокатки, називають *допоміжним обладнанням* (допоміжними механізмами). До такого обладнання відносяться механізми встановлення розхилу між валками (натискні гвинти),

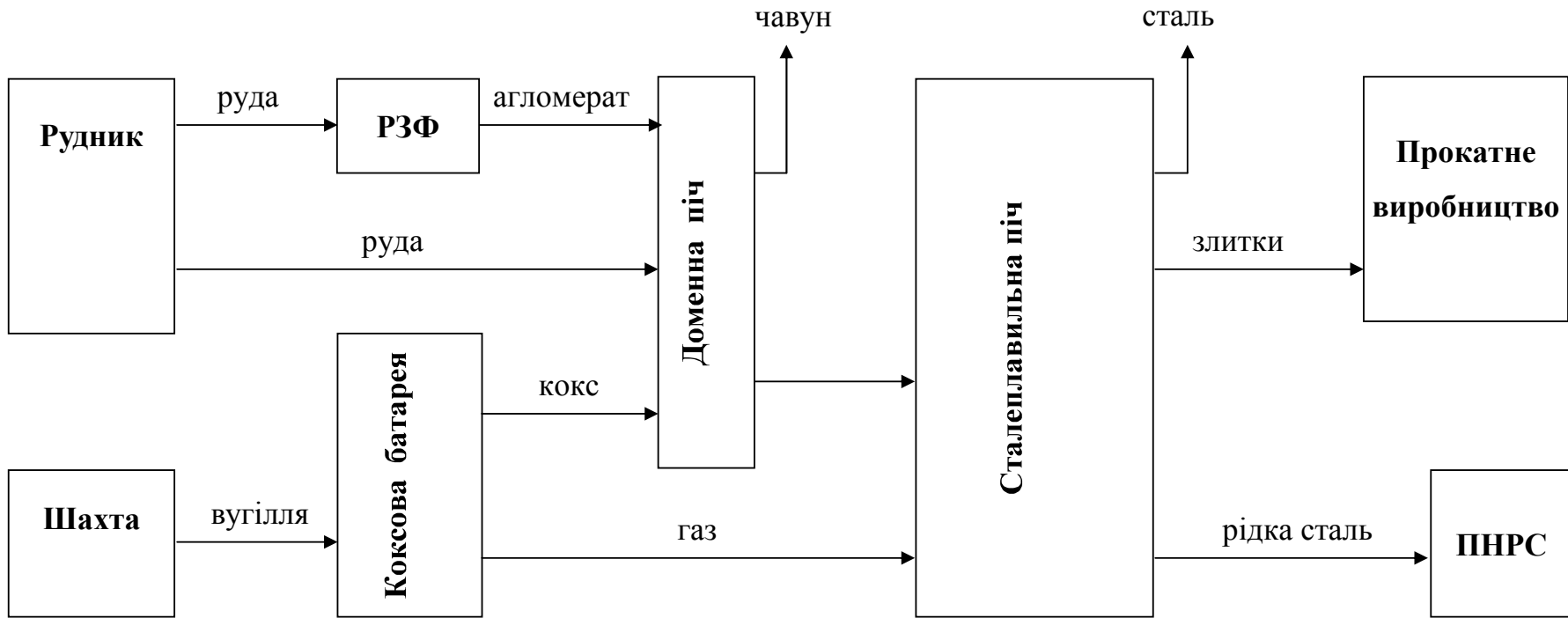


Рис. 1.1. Технологічна схема металургійного виробництва

транспортування металу (рольганги, шлеппери, контейнери та ін.), різання (ножиці, пилки), намотування та розмотування (моталки) та ін.

Під *прокатним станом* розуміють комплекс основного обладнання для виробництва прокатного профілю з усім відповідним допоміжним обладнанням.

Стани, які призначені для виробництва різних видів прокату (заготовки, сортова сталь, листи, рейки, труби та ін.) суттєво відрізняються один від одного як за конструктивним виконанням, так й за складом обладнання.

Класифікація прокатних станів.

1. За призначенням: а) обтискні; б) заготівельні; в) сортопрокатні: дрібносортові, середньосортові, крупносортові; г) листові: товстолистові, середньолистові, тонколистові; д) трубопрокатні; є) рейко-балкові; ж) колесо-бандажні; з) дротові; к) холодної прокатки.

Обтискні стани призначені для обтискання злитків у квадратну заготовку – *блюм*, або плоску заготовку – *сляб*.

Заготівельні стани виконують додаткове обтискання блюмів.

Сортопрокатні стани виконують прокатку сталі квадратної та круглої форми, кутової сталі, балок та ін.

Листові стани гарячої прокатки прокатують лист різної товщини: товстолистові – більше 4 мм, середньолистові – 1...4 мм, тонколистові – до 1...4 мм.

Листові стани холодної прокатки прокатують тонкий лист, жерсть і смуги товщиною 0,0015...4 мм.

Рейкобалкові стани прокатують рейки та крупні балки висотою 240...600 мм.

Колесо-бандажні стани призначені для прокатки бандажів та залізничних коліс.

Дротові стани прокатують дріт діаметром 5...9 мм.

2. За кількістю валків: а) 2-х валкові – дуо (рис.1.2, а); б) 3-х валкові – тріо (рис.1.2, б); в) 4-х валкові – кватро (рис.1.2, в); г) багатовалкові (рис.1.2, г).

Двохвалкові кліті найбільш розповсюджені. Вони використовуються в реверсивних обтискних та товстолистових станах, у заготівельних та сортових станах.

У багатовалкових станів прокатними є два валки, а решта – опорні для зниження пружної деформації валків при прокатці.

3. За розташуванням валків: а) горизонтальні; б) вертикальні; в) косі; г) універсальні (з горизонтальними та вертикальними валками).

4. За кількістю та розташуванню клітей: а) одноклітеві; б) багатоклітеві: 1) лінійні (рис.1.3, а); 2) послідовні (рис.1.3, б); 3) безперервні (рис.1.3, в); 4) напівбезперервні (рис.1.3, г); 5) шахматні; 6) Z – подібні.

Одноклітеві стани мають значне розповсюдження і використовуються як:

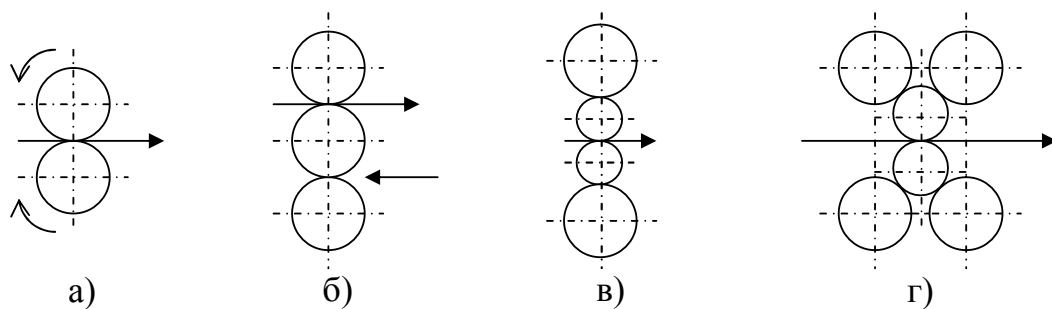


Рис.1.2. Класифікація прокатних станів за кількістю валків.

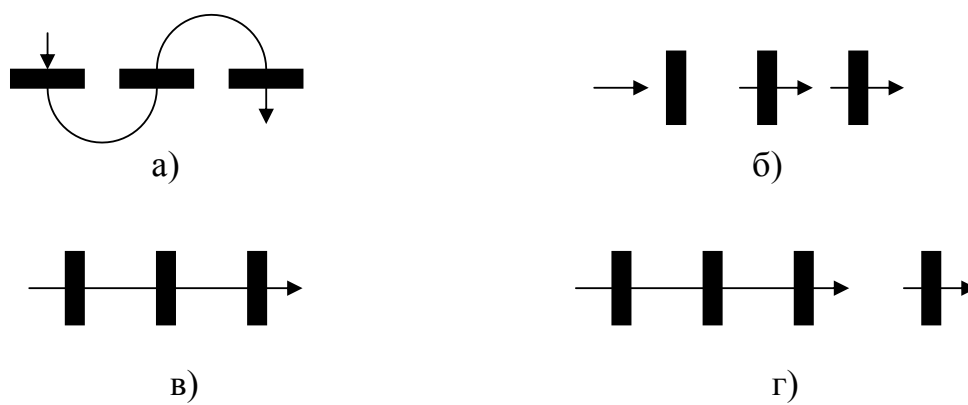


Рис.1.3. Класифікація прокатних станів за розташуванням клітей.

обтискні стани; реверсивні стани для прокатки труб, товстих та середніх листів; реверсивні стани холодної прокатки.

Лінійні стани мають усі кліті, розташовані в одну лінію, з одним двигуном і загальною шестеренною кліттю. Лінійні стани використовуються, в основному для прокатки сортового металу.

Послідовні стани складаються з декількох клітей, розташованих послідовно одна за другою. Таке розташування зустрічається в обтискних і товстолистових станах.

Неперервні стани мають робочі кліті, зв'язані між собою через метал. Зазвичай, неперервні стани розділяються на дві групи клітей – *чорнову* та *чистову*. Попереднє обтискання виконується у чорновій групі, а доведення прокату до кондиції виконується у чистовій групі. Чорнова група може складатися з однієї реверсивної кліті, або групи клітей, розташованих згідно з рис. 1.3.

5. За режимом роботи: а) нереверсивні, що не регулюються; б) нереверсивні, що регулюються; в) реверсивні, що регулюються.

Розмір прокатного стану характеризується діаметром прокатних валків. Розмір трубокатного стану характеризується зовнішнім діаметром труби, що прокатується.

В таблиці 1.1. наведені приклади прокатних станів, що використовуються на металургійних підприємствах України.

1.3. Механічне обладнання прокатних станів

Основна операція прокатки виконується за допомогою валків, які розташовані в робочій кліті і обертаються (рис. 1.4). Кінематична схема, яка відповідає рис. 1.4, а, представлена на рис. 1.5.

Кліть складається зі станини 1, двох робочих валків 2, натискного пристрою 3, шпінделів 4, двигуна 5 і шестеренної кліті 6.

Натискний пристрій (натискні гвинти) призначений для переміщення верхнього робочого валка у вертикальному напрямку для забезпечення необхідної величини обтискання металу.

Шестеренна кліть призначена для передачі від одного двигуна обертання двом або трьом валкам. Вона представляє собою зубчасту передачу, яка складається з двох або трьох шестерній однакового діаметру, розташованих в закритій коробці.

Шпінделі слугують для передачі обертання валкам від шестеренної кліті. Кожний такий шпіндель має на своїх кінцях шарніри.

Муфти 8 використовуються для сполучення двигуна й шестеренної кліті.

На реверсивних клітях станів гарячої прокатки використовують два

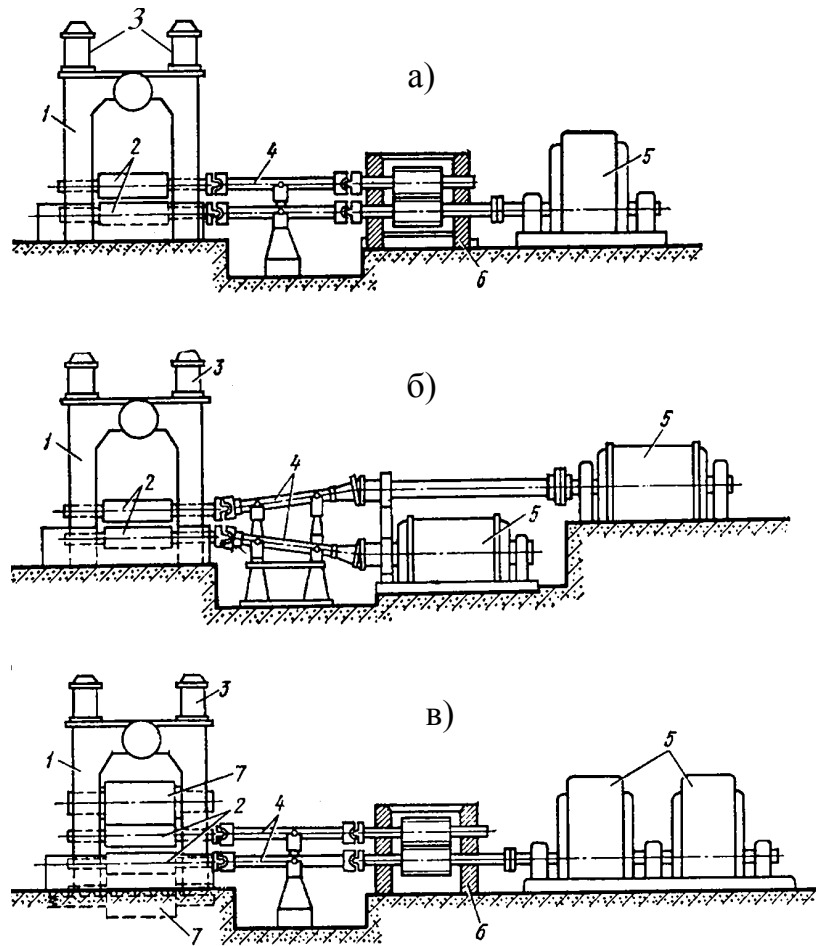


Рис.1.4. Обладнання робочої кліти стану

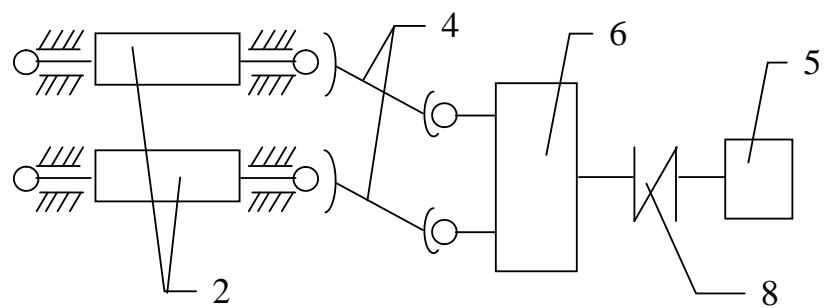


Рис.1.5. Кінематична схема привода кліти прокатного стану

позначення: 1 – станина; 2 – робочі валки; 3 – натискаючий пристрій;
4 - шпинделі; 5 – двигун; 6 - шестернева кліть; 7 - додаткові валки; 8 - муфта

Таблиця 1.1

Прокатні стани металургійних підприємств України

ПІДПРИЄМСТВО	Б Л М *	С Л Б	З Г Т	С Т М	С Т С	С Т К	Л П К	Л П С	Л П Т	Т Р	Р Б	К Б	Д Р	Х П
Алчевський металургійний ком- бінат	Х					Х	Х							
Дніпровський металургійний комбінат (м.Дніпродзержинськ)	Х				Х	Х	Х				Х			
Донецький металургійний завод	Х			Х	Х		Х							
Єнакіївський металургійний завод	Х		Х	Х	Х	Х							Х	
Запорізький металургійний ком- бінат "Запоріжсталь"		Х					Х	Х	Х					Х
Краматорський металургійний за- вод				Х		Х								
Криворізький металургійний ком- бінат "Криворіжсталь"	Х		Х	Х									Х	
Маріупольський металургійний комбінат "Азовсталь"	Х					Х	Х				Х			
Макіївський металургійний ком- бінат	Х		Х		Х	Х							Х	
Маріупольський металургійний комбінат		Х					Х	Х	Х	Х				Х
Нижньодніпровський трубопро- катний завод (м. Дніпропетровськ)										Х	Х	Х		
Електрометалургійний завод "Дніпроспецсталь" (м. Запоріжжя)	Х		Х	Х		Х								

* – примітки: БЛМ – блюмінг, СЛБ – слябінг, ЗГТ – заготовельний стан, СТМ – дрібносортовий, СТК – середньосортовий, СТК – крупносортовий, ЛПК – товстолистовий, ЛПС – середньолистовий, ЛПТ – тонколистовий, ТР – трубний, РБ – рейко-балковий, КБ – колесобандажний, ДР – дровтовий, ХП – холодної прокатки.

варіанти привода робочих валків: груповий й індивідуальний.

При *груповому приводі* валки обертаються від одного двигуна через шестеренну кліть (рис.1.4, а). При індивідуальному приводі кожний робочий валок обертається від свого двигуна, а шестеренна кліть відсутня (рис.1.4, б).

Широко розповсюджені, особливо для листових станів, чотирьохвалкові кліті з двома опорними валками (рис. 1.4, в). В таких клітях конструктивно складно виконати індивідуальний привод. Для збільшення продуктивності стана у цьому випадку використовують двохякірні і триякірні двигуни, з передачею моменту через шестеренну кліть.

1.4.Електричне обладнання прокатних станів

Електричні машини. До електропривода металургійних агрегатів, зазвичай, пред'являються наступні вимоги:

- часті пуски та гальмування;
- швидке протікання перехідних процесів;
- широкий діапазон регулювання швидкості;
- висока перевантажувальна здатність.

Усім цим і іншим вимогам відповідають електроприводи постійного струму. В крупних прокатних станах використовуються *двигуни постійного струму* граничної потужності, яка обмежується наступними межами:

- 1) напруга між сусідніми колекторними пластинами складає 10...20 В;
- 2) величиною лінійного струмового навантаження (200...2000 А/см);
- 3) механічним напруженням на якорі за рахунок лінійної швидкості (до 70 м/с);
- 4) умовами нормальної комутації (величина реактивної ЕРС у комутуючій секції 5...8 В).

Основним показником технічного прогресу прокатних двигунів є збільшення одиничної потужності у одному якорі. У теперішній час потужність окремих прокатних двигунів складає до 20000 кВт.

Збільшення потужності двигунів постійного струму останнім часом забезпечується за рахунок використання новітніх технологій при виготовленні нових марок сталі, сплавів, хімічних полімерів, а також за рахунок створення нової електромагнітної геометрії електричної машин, зокрема, використання двоходових та триходових обмоток якоря. Поліпшення комутації забезпечується використанням компенсаційної обмотки. Одним із способів збільшення встановленої потужності прокатного стана є створення двохякірних (Україна, Росія), або три- та чотириякірних прокатних двигунів (США, Західна Європа, Японія).

Згадані вище заходи дозволяють збільшити номінальну потужність на полюс. Однак, при збільшенні потужності двигуна його момент інерції

зростає швидкіше від обертаючого моменту (потужності). Тому не випадково, що модернізація головних електроприводів прокатних станів у бік зростання потужності у теперішній час досить обмежена й, за звичай, супроводжується заміною на двигун такої ж потужності і фундаменту.

Основними заводами-виготівниками двигунів є концерн "Електромеханічні заводи KLG", куди входять ВАТ "Електромашина" (м.Харків, Україна), ВАТ "Південелектромаш" (м. Нова Каховка, Україна), ЗАО "Завод крупных электрических машин" та "Неваэлектромаш" (Росія), "Siemens", "AEG" (Германія), "Мітцубіші" (Японія), "Дженерал електрик" (США).

Наприклад, ВАТ "Електромашина", між іншим, випускає електричні машини загальнопромислового і спеціального призначення постійного струму серії 4П габаритів 200–280, 315–355, 4ПФ габаритів 200–250, серії 5П габаритів 100–160. Фірма "Siemens" випускає двигуни постійного струму потужністю 0,55...1500 кВт, номінальним моментом 5...40900 Нм.

Асинхронні двигуни використовуються, зазвичай, для нерегульованих електроприводів, що працюють у тривалому або повторно-короткочасному режимі з відносно невеликою частотою включень.

Асинхронні двигуни у складі частотного електропривода переважно використовуються для регулювання швидкості, наприклад, рольгангів.

Найбільш характерним типом асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором є двигуни серії 4А (концерн "Електромеханічні заводи KLG", "Південелектромаш"). Серед закордонних двигунів поширеними є двигуни фірми "Siemens" типу 1LA як для роботи з перетворювачами частоти, так і без них.

Останнім часом виготовляються потужні асинхронні двигуни для прокатних станів. Наприклад, фірмою "Siemens" виготовляються високовольні двигуни типу H-modun на потужність до 20 МВт (2-х полюсні), до 35 МВт (4-х полюсні), до 40 МВт (6-ти полюсні), до 30 МВт (4-х полюсні). При цьому напруга живлення складає 10кВ (50 Гц) або 13,2 кВ (60 Гц).

Характерною особливістю рольгангових асинхронних двигунів серії 4АМСУ є значне номінальне ковзання, яке суттєво перевищує номінальне ковзання краново-металургійних двигунів. Такі спеціальні механічні характеристики відповідають тяжким режимам роботи рольгангів з індивідуальним приводом роликів: а) пробуксовування, проковзування металу; б) заклинювання металу; в) тимчасові зупинки під струмом окремих перевантажених двигунів при роботі інших та ін.

Синхронні двигуни знайшли своє використання у приводах воздуходувок, насосних установок та компресорів доменного виробництва, у електроприводах нерегульованих прокатних станів (чорнова група клітей).

Потужності синхронних двигунів досягають значень 50 МВА.

Слід сказати, що синхронний двигун традиційної конструкції та вентильні двигуни при інших рівних умовах мають момент інерції на 30...35% більше, ніж у двигуна постійного струму.

Вентильні перетворювачі. Найбільш розповсюдженим у прокатному виробництві є *електропривод постійного струму* за системою "тиристорний перетворювач – двигун". Існує широка номенклатура тиристорних перетворювачів, які відрізняються між собою силовою схемою, системою керування та захисту, тощо.

Силові схеми тиристорних перетворювачів розрізняються за наступними ознаками.

1. Кількість вторинних фаз після трансформатора: а) одинарне число вторинних фаз (трифазне випрямлення); б) подвоєне число вторинних фаз (шестифазне випрямлення); в) збільшене у чотири рази число вторинних фаз (дванадцятифазне випрямлення).

Зустрічаються 18-, 24-, 36-ти фазні схеми. Збільшення фазності викликано необхідністю зменшення пульсацій випрямленої напруги, збільшення при цьому використання трансформатора, зниження числа та рівня гармонік у первинному колі.

2. Спосіб включення тиристорів у блоку: нульові (однотактні) або мостові (двохтактні) схеми включення. У теперішній час нульові схеми зустрічаються тільки в малопотужних приводах (вторинні струми не перевищують 100 А), тому що вони створюють потік однонаправленого підмагнічування, що є недоліком.

3. Спосіб з'єднання обмоток трансформатора: а) зірка (трикутник) – зірка; б) зірка (трикутник) – зигзаг (подвоєний зигзаг); в) зірка (трикутник) – подвоєна зірка із з реактором, що урівнює.

При з'єднанні за схемою "зигзаг" співвідношення між напругою і струмом такі ж, що і при з'єднанні "зірка", але для отримання такої ж фазної напруги число витків трансформатора повинно бути збільшене у 1, 16 разів.

4. Реверсивна або нереверсивна схема з'єднання блоків (мостів) тиристорів. Існують декілька типів з'єднання мостів. Більш докладно з цього приводу буде сказано у п.3.4.

До силової схеми тиристорів додаються інші блоки: реактори або трансформатори, комутаційна апаратура, збуджувач двигуна, пристрої керування, системи управління, тощо. Все це обладнання поєднується у *комплектному електроприводі*. Якщо комутаційна апаратура у колі навантаження та пристрої керування комутаційною апаратурою відсутні, а також система управління існує у спрощеному вигляді або також відсутня, то такі силові пристрої називаються *тиристорними агрегатами*.

Силова частина комплектного електропривода має:

– реверсивний або нереверсивний тиристорний міст для живлення якоря двигуна;

– анодні реактори й автоматичний вимикач чи низьковольтний трансформатор при напрузі живлення 380 В (1-й варіант), або силовий трансформатор і шафа високовольтного вводу при 6-ти, 10-ти кВ напруги живлення (2-й варіант);

- тиристорний міст з реакторами або діодний міст однофазного живлення обмоток збудження двигуна;
- силову комутуючу апаратуру;
- систему управління та регулювання.

Серед вітчизняних комплектних електроприводів найбільш розповсюдженими у металургійній промисловості є електроприводи типу КТЭ (ВАТ Запорізький завод “Перетворювач”) та КТЭУ (ВО "ХЕМЗ", м. Харків).

Електроприводи тиристорні комплектні з природним повітряним охолодженням типу КТЭ застосовуються для основних і допоміжних механізмів, що вимагають автоматичного регулювання частоти обертання, положення вала, потужності, випрямленої напруги й ЕРС двигуна, натягу матеріалу. Діапазон номінальних напруг 220...930 В, діапазон номінальних струмів 25...12500 А. Напруга живлення власних потреб: 3 х 380В + 10% - 15% змінного струму. Глибина регулювання випрямленої напруги 100...0...100%. Максимально припустимий струм перевантаження протягом 15 с складає рівень двох номінальних струмів. Випускаються в трансформаторному і реакторному варіантах. Спосіб керування електроприводами – імпульсно-фазовий. Діапазон регулювання зі зворотним зв'язком за ЕРС 25:1. Діапазон регулювання швидкості (із застосуванням прецизійного тахогенератора) 100:1. Час реверсу струму в якірному колі не більше 30 мс.

Похибка обмеження струму якоря не більше 10%. Регулювання темпу наростання струму якоря від 40 до 100 номінальних значень, А/с. Похибка стабілізації швидкості обертання (при зворотному зв'язку за ЕРС) не більше 4%, при зворотному зв'язку за швидкістю – не більше 1 %.

Діапазон регулювання статичного струму якоря електроприводів, регульованих за потужністю і положенню складає 10:1 при незмінній швидкості обертання.

КТЭ мають наступні типові виконання:

– за кількістю двигунів, що живляться:

а) однодвигуновий без лінійного контактора; б) двохдвигуновий із загальним живленням якірного кола; в) багатодвигуновий; г) однодвигуновий з лінійним контактором; д) електроприводи (тиристорні збудники) для керування в колі збудження;

– за режимом роботи:

а) нереверсивний; б) реверсивний з реверсом струму в обмотці збудження; в) реверсивний з реверсом струму в якірному колі;

– за зв'язком з живильною мережею:

а) реакторне виконання; б) трансформаторне виконання;

– за наявністю вбудованих пристроїв:

а) пристрій динамічного аварійного гальмування; б) пристрій живлення обмотки збудження тахогенератора; в) пристрій живлення електромагнітного гальма; г) пристрій живлення обмотки збудження двигуна.

– за виконанням автоматичної системи регулювання (АСР):

а) без АСР; б) АСР швидкості однозонна; в) АСР швидкості двохзонна з лінеаризацією; г) АСР положення однозонна; д) АСР положення двохзонна; е) АСР швидкості двохзонна; ж) АСР потужності однозонна; з) спеціальна АСР; і) АСР швидкості з пристроєм синхронізації по положенню; к) цифрова АСР положення; л) АСР швидкості з реверсом поля; м) АСР головного привода обтискного стану, а також Г-Д системи; н) АСР натягу (потужності) із системою керування швидкісними режимами; о) цифрова АСР положення з цифровою синхронізацією; п) АСР швидкості із системою керування швидкісними режимами; р) АСР міжклітевого натягу; с) АСР вільної прокатки; т) цифрова АСР швидкості; у) АСР швидкості двухвигунового привода з впливом по збудженню; ф) АСР швидкості і натягу (без пристрою обчислення радіуса); х) АСР швидкості зі спрощеною структурою; ц) АСР швидкості із системою керування станом холодної прокатки; ч) АСР швидкості зі східчастим завданням; ш) АСР швидкості кліті товстолистового стана гарячої прокатки; щ) АСР міжклітевого натягу з пристроєм виділення статичних струмів; э) АСР швидкості однозонна багатодвигунового привода на 5, 10, 15 чи 20 двигунів з виділенням максимально навантаженого; ю) АСР швидкості кліті стана гарячої прокатки з груповим приводом валків.

Нова серія комплектних тиристорних електроприводів постійного струму КТЭ 4-го покоління розроблена на базі виробів 3-го покоління з повною заміною систем керування.

Нова система керування виконана у виді малогабаритного моноблока, що вбудовується в силові шафи перетворювачів на струми до 1000 А і в шафи керування для перетворювачів на струми 1600...12500 А. Застосовано елементну базу провідних світових виробників – Intel, Burr Brown, Motorola, Texas Instruments і ін.

Блок керування уніфікований для усіх виконань КТЭ на струми 10...12500 А. Він дозволяє модифікувати застарілі вироби споживачів заміною тільки систем керування, зі збереженням силової, трансформаторно-реакторної і релейно-контакторної частини перетворювачів.

Особливістю нових систем є наявність двохпроводної швидкодіючої мережі.

Прикладом закордонних комплектних електроприводів постійного струму є електроприводи типу SIMOREG DC MASTER фірми SIEMENS. Діапазон потужностей як для реверсивних, так і для нереверсивних приводів складає від 6,3 кВт до 2 000. Діапазон номінальних струмів лежить у межах від 15 А до 2 000 А і може бути збільшений до 10 000 А шляхом рівнобіжного з'єднання перетворювачів (до 5 блоків). Діапазон напруг – від 400 В до 830 В.

Відмінними рисами SIMOREG DC MASTER є висока точність і швидкодія, обумовлені застосуванням цифрової мікропроцесорної техніки: цифрова система імпульсно-фазового керування (СІФК) реверсивного тиристорного перетворювача кола струму якоря; цифрова СІФК нереверсив-

ного тиристорного перетворювача кола струму збудження; цифровий контур струму якоря; цифровий контур швидкості; цифровий контур струму збудження; цифровий контур ЕРС.

В одному комплектному мікропроцесорному пристрої об'єднані функції двох систем системи керування – власне електроприводом і технологічною системою.

Вентильні *електроприводи змінного струму* використовуються у металургійній промисловості, в основному, для допоміжних механізмів. Перш за все це електроприводи за системою "перетворювач частоти – асинхронний двигун", побудовані на основі інверторів напруги з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

Інвертори будуються на основі IGBT транзисторів з максимальними параметрами 3,3 кВ, 1200А, 2400А; 4,5 кВ, 3,6 кА; 6 кВ, 1,2 кА. Крім того використовуються також IGCT – транзистори на 4,5 кВ і струм до 4 кА.

Серед вітчизняних частотних електроприводів розповсюджений електропривод на IGBT транзисторах типу ПЧ (ВАТ Запорізький завод "Перетворювач") на потужності у діапазоні 1,5...400 кВт, номінальний струм 8,0...630 А. Діапазон зміни вихідної частоти 0,1...50(400) Гц, діапазон зміни вихідної напруги 0...220 В, 0...380 В. Тактова частота ШІМ 1...16 кГц. Коефіцієнт потужності не менше 0,93.

Відомими в Україні є електроприводи корпорації "Тріол":

- АТ03 – високовольтні (трансформаторні) електроприводи потужних машин і механізмів на основі ПЧ із напругою 0,4 кВ (160, 200, 250, 320, 400, 500, 630, 750, 950, 1250, 1500, 1600 кВт);

- АТ07 – високовольтні (безтрансформаторні) електроприводи мережних і циркуляційних насосів великої продуктивності (1600 – 5000 кВт, 6 кВ);

- АТ09 – високовольтний (трансформаторний) електропривод на основі ПЧ із напругою 0,66 кВ і вище (400, 800, 1250, 1600 кВт);

- СТ10 – високовольтний синхронний електропривод для регулювання частоти обертання й автоматичного керування режимами насосів, вентиляторів, димососів і інших механізмів (320, 400, 500, 630, 1000, 1250, 1600 кВт);

- АТ04 – універсальні електроприводи широкого спектра виробничих машин і механізмів, у тому числі з підвищеними статичними і динамічними вимогами (5,5; 7,5; 11; 15; 22; 37; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315 кВт);

- АТ05 – високодинамічні електроприводи механізмів з високими вимогами до регулювання параметрів при чотирьохквadrантному керуванні (5,5; 7,5; 11; 15; 22; 37; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315 кВт);

- АТ06 – об'єктно-орієнтовані електроприводи насосних станцій тепло- і водопостачання (5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37 кВт).

Прикладом закордонних електроприводів може слугувати частотний електропривод фірми SIEMENS типу SIMOVERT masterdrives Vector

Control з повітряним охолодженням і 6-пульсною діодною схемою на вході для постійного і квадратичного моменту навантаження. Статичний перетворювач частоти з проміжним контуром постійної напруги номінальною потужністю від 2,2 до 2300 кВт, поставляються як у шафовому так і у виконанні, що вбудовується, зі ступенем захисту від IP00 до IP54 (повітряне охолодження) чи IP65 (водяне охолодження).

Відомі також інші частотні електроприводи. Приклади найбільш поширених з них у металургійній промисловості представлені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Приклади частотних електроприводів

Країна	Фірма	Приклад моделі
Австрія	STROMAG	MICROSYN
Великобританія	CONTROL TECHNIQUES	COMMANDER-GP, UNI-VTC
Данія	DANFOSS	VLT
Німеччина	SIEMENS	SIMODRIVE
Німеччина	LENZE	9100
Німеччина	AEG	A900
Польща	APATOR CONTROL	AMD-F
США	ALLEN BRADLEY	VAGER
Франція	SCHNEIDER	ALTIVAR
Швеція	ABB	ASC
Японія	OMRON	3G3
	MITSUBISHI	FR

1.5. Основи теорії прокатки

Прокаткою називається зміна розмірів і форми металу шляхом його обробки тиском за допомогою валків.

Прокатка буває поздовжньою, поперечною, косою.

Поздовжня прокатка забезпечує деформацію металу між двома валками, які обертаються назустріч один одному. При цьому метал має поступальний рух через прокатну кліть (рис. 1.2, а).

Поперечна прокатка виконується валками, які обертаються в одну сторону. При цьому метал має поступово-обертальний рух. Такий тип прокатки використовують для виготовлення тіл обертання.

Коса прокатка виконується валками, які теж обертаються в одну сторону. Валки розташовані під кутом один до одного (рис. 1.6). Метал має поступово-обертальний рух. Такий тип прокатки використовують для виготовлення безшовних труб.

По температурному режиму розрізняють холодну та гарячу прокатку.

Гаряча прокатка відбувається при температурі металу вище 600...650°C. При гарячій прокатці на поверхні з'являється окалина, яку треба зламувати. При такій прокатці неможливо виготувати тонкий лист.

Холодна прокатка відбувається при температурі металу нижче 400...450°C.

При холодній прокатці відбувається *наклеп* – зміцнення поверхневого шару металу. Метал стає жорстким та хрупким. Наклеп можна зняти, якщо нагріти метал до такої температури, при якій відбувається *рекристалізація* – відновлення кристалічної решітки. Повна рекристалізація відбувається при температурі гарячої прокатки.

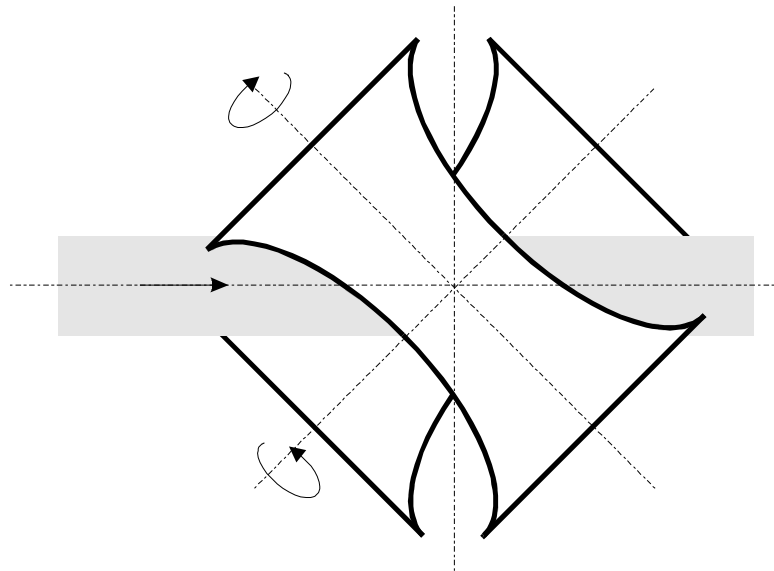


Рис.1.6. Коса прокатка

Процес прокатки розглядатимемо з умов *прості прокатки*.

Умови простої прокатки: 1) метал однорідний; 2) валки мають однаковий діаметр та однакову окружну швидкість; 3) на метал діють тільки сили, які прикладені до валків (рис. 1.7); 4) метал деформується кожним валком однаково.

Введемо деякі поняття та позначення.

Однократний прохід металу через валки при їх обертанні називається *пропуском*. Прокатка металу виконується у декілька пропусків. В кожному пропуску здійснюється подовження заготовки за рахунок обтискання металу валками і відповідного зменшення його перетину через те, що ширина металу в результаті прокатки збільшується незначно.

Подовження заготовки характеризується *витяжкою* $\Delta L = L_2 - L_1$ (рис.1.7) і *коефіцієнтом витяжки* – відношенням довжини металу після прокатки до довжини металу до прокатки. Вважається, що об'єм металу при прокатці зостається незмінним, тому при нехтуванні розширенням металу, маємо

$$\lambda = L_2/L_1 = F_1/F_2 = h_1/h_2 . \quad (1.1)$$

Розрізняють *частковий коефіцієнт витяжки* як відношення довжини заготовки після i -го пропуску L_{i+1} до довжини заготовки i -го пропуску L_i

$$\lambda'_i = L_{i+1}/L_i , \quad (1.2)$$

та *повний коефіцієнт витяжки* як добуток часткових коефіцієнтів витяжки

$$\lambda_i = \lambda'_1 \cdot \lambda'_2 \cdot \lambda'_3 \cdot \dots \cdot \lambda'_i . \quad (1.3)$$

Дуга окружності робочого валка, яка прилягає до металу, називається *дугою захвату*.

Простір між валками, обмежений дугами захвату, перетинами входу і виходу металу, а також боковими сторонами металу називається *зоною деформації* металу (рис.1.7, заштриховано).

Лінійна швидкість металу до валків більше лінійної швидкості металу після валків. Тому в зоні деформації існує такий перетин, в якому середня швидкість металу дорівнює окружній швидкості робочих валків. Такий перетин називається *нейтральним* або *критичним перетином*. Критичний перетин поділяє зону деформації на область відставання та область випередження.

В області відставання метал має лінійну швидкість ϑ_1 , яка менше окружної швидкості валків ϑ_g . В області випередження метал має лінійну швидкість ϑ_2 , яка більше окружної швидкості валків. Відносна різниця лінійних швидкостей в області випередження має назву *випередження* і визначається формулою

$$S = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_g}{\vartheta_g} . \quad (1.4)$$

Центральний кут, який відповідає критичному перетину, називається *нейтральним* або *критичним кутом*. Критичний кут визначається формулою Павлова

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta} \right) , \quad (1.5)$$

де $\beta = \arctg(f)$ – кут тертя.

Випередження визначається за допомогою відомого критичного кута

$$S = \frac{D\gamma^2}{2h_1} , \quad (1.6)$$

де D – діаметр валка.

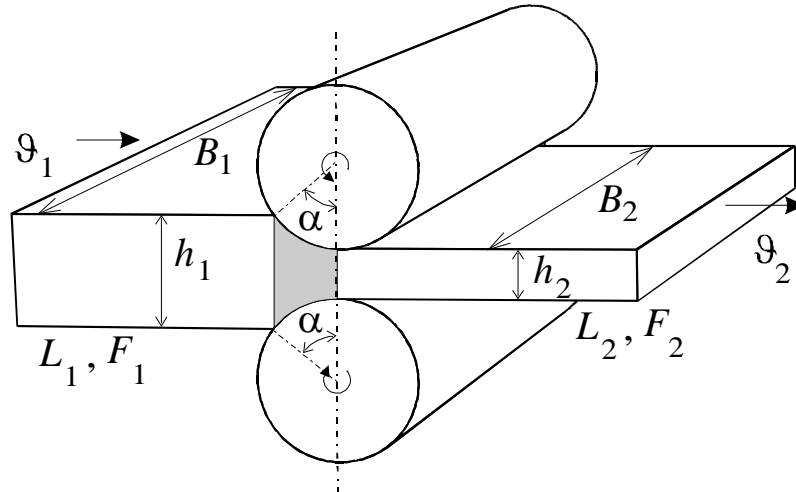


Рис.1.7. Просторова схема простої прокатки:
 h_1, h_2 - товщина злитку до і після пропуску;
 B_1, B_2 - ширина металу до і після пропуску;
 L_1, L_2 - довжина заготовки до і після пропуску,
 v_1, v_2 - лінійна швидкість металу до кліті;
 F_1, F_2 - перетин злитку до і після пропуску.
 α - кут захвату.

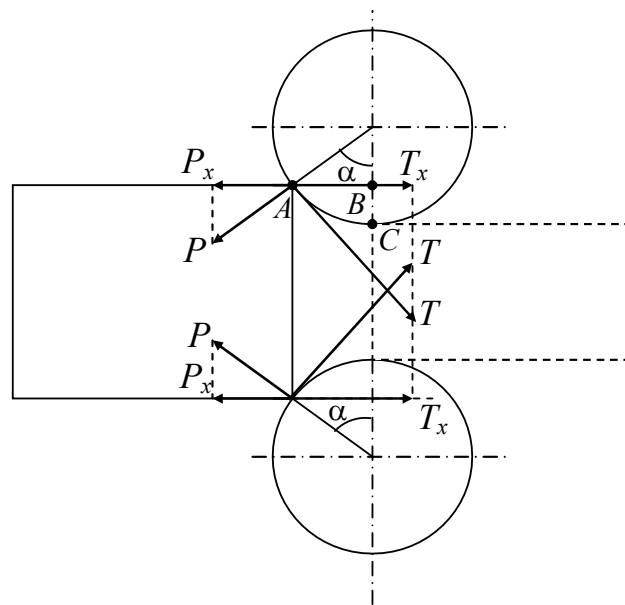


Рис.1.8. Зусилля при захваті заготовки валками

Величина випередження лежить в межах 3...5%. Для тонких листів величина випередження досягає 10...15%.

Процес прокатки починається з захвату металу валками. У момент захвату валки діють на метал з силою P (рис. 1.8). Під дією цієї сили виникає сила тертя T . Для виконання захвату металу необхідно, щоб сила втягування була більше сили відштовхування, тобто $T_x > P_x$. З рис 1.8 випливає $T \cos \alpha > P \sin \alpha$. Враховуючи, що $T = f \cdot P$, отримуємо умову захвату

$$f > \operatorname{tg} \alpha . \quad (1.9)$$

Таким чином, захват металу валками відбудеться у тому випадку, коли коефіцієнт тертя буде більше тангенса кута захвату. З даних досвіду гарячої прокатки коефіцієнт тертя коливається в межах 0,25...0,6.

З геометричних співвідношень (рис.1.8) можна знайти *обтиск*

$$\Delta h = h_1 - h_2 = D(1 - \cos \alpha) . \quad (1.10)$$

1.6. Визначення моменту прокатки і моменту на валу двигуна

Момент на валу двигуна дорівнює

$$M = M_{np} + M_{mp} + M_{nx} + M_{\partial} , \quad (1.11)$$

де M_{np} – момент прокатки, який необхідний для виконання роботи деформації металу і подолання сил тертя між металом та валками в зоні деформації; M_{mp} – момент додаткових сил тертя у підшипниках валків і передатних механізмах (редуктор, шестеренна кліть, шпінделі) при прокатці металу без урахування сил тертя, які діють при неробочому ході кліті; M_{nx} – момент неробочого ходу, тобто сил тертя, які виникають у підшипниках валків і передатних механізмах (редуктор, шестеренна кліть, шпінделі) за відсутністю прокатки у кліті; M_{∂} – динамічний момент, необхідний для подолання сил інерції в перехідних електромеханічних процесах.

Для розрахунку моменту прокатки і моменту тертя існує два основних способи: 1) з використанням тиску металу на валки; 2) за допомогою питомих кривих розходу енергії на прокатку.

На практиці раніше за усе використовують той спосіб, для якого маються найбільш повні вихідні дані для розрахунку. У тих випадках, коли це можливо, розрахунок ведеться обома способами. При цьому один з них є основним, а інший контрольним.

Розрахунок моменту прокатки з використанням тиску металу на валки. Момент прокатки на два валки може бути визначений за відомою формулою.

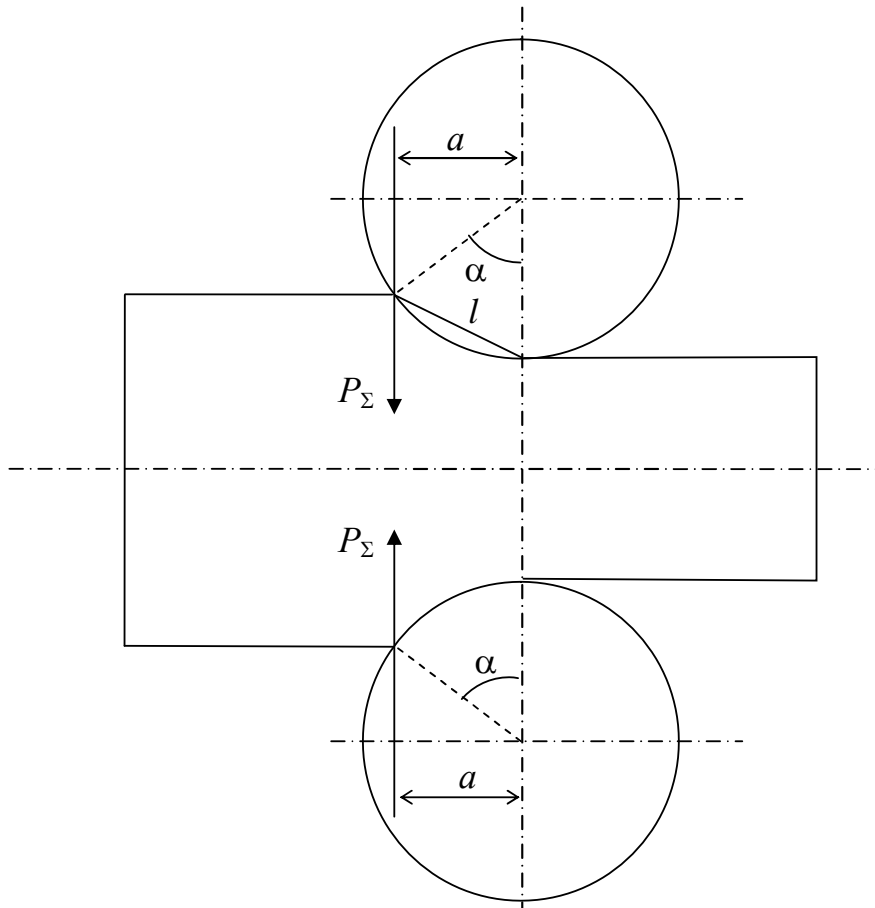


Рис.1.9. Рівнодіючі тиску металу на валки

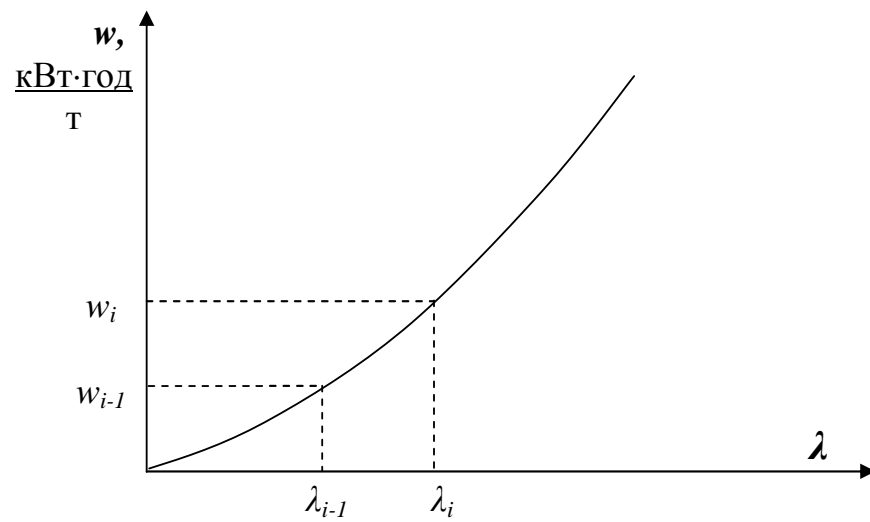


Рис.1.10. Крива питомого розходу енергії на прокатку

$$M_{np} = 2 \cdot P_{\Sigma} \cdot a, \quad (1.12)$$

де P_{Σ} – сила повного тиску металу на один валок (рівнодіюча тиску), a – плече рівнодіючої тиску металу на один валок (рис.1.9).

При простій прокатці рівнодіюча тиску металу на валок направлена вертикально, тому

$$a = \psi \cdot l, \quad (1.13)$$

де l – довжина хорди дуги захвату; ψ – коефіцієнт координати рівнодії, при гарячій прокатці $\psi = 0,5$; при холодній $\psi = 0,35 \dots 0,45$.

Довжина хорди дуги захвату l знаходиться з рис.1.9 і формули (1.10)

$$l = \sqrt{D \cdot \Delta h / 2}. \quad (1.14)$$

В практиці розрахунків P_{Σ} широко розповсюджений метод так званого середнього питомого тиску металу на валки p_{cp} . В цьому випадку P_{Σ} знаходиться як добуток p_{cp} на площу зіткнення металу з валком F_3 , тобто

$$P_{\Sigma} = p_{cp} \cdot F_3, \quad (1.15)$$

де $F_3 = B \cdot l$.

Для розрахунку середнього питомого тиску p_{cp} використовується формула Целікова

$$p_{cp} = k \frac{2h_2}{\Delta h(\delta - 1)} \left(\frac{h_k}{h_2} \right) \left[\left(\frac{h_k}{h_2} \right)^{\delta} - 1 \right], \quad (1.16)$$

де $k = 1,15 \cdot \sigma_f$, Н/мм²; σ_f – межа текучості металу, Н/мм²; $\delta = f \sqrt{2D/\Delta h}$; h_k – висота металу в критичному перетині, мм.

Відношення h_k/h знаходиться з рівняння

$$\frac{h_k}{h_2} = \left(\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1)(h_1/h_2)^{\delta}}}{\delta + 1} \right)^{1/\delta}. \quad (1.17)$$

Розрахунок моменту прокатки за допомогою питомих кривих розходу енергії на прокатку. Цей спосіб досить розповсюджений в практиці розрахунків через те, що розрахунки за наведеними вище аналітичними формулами мають невисоку точність. Особливо це відноситься до випадку прокатки складних профілів. Для знаходження енергії, що витрачена на прокатку, запропоновано багато емпіричних формул, які теж дають приблизні результати.

Більш точно витрати енергії на прокатку визначаються за результатами експериментальних досліджень прокатних станів. Шляхом таких досліджень можливо встановити витрати енергії в кожному пропуску.

Результати експериментальних досліджень оформлюють у вигляді так званих *кривих питомих розходу енергії на прокатку*.

Криві питомих розходу енергії на прокатку отримують таким чином. Під час прокатки реєструється загальний розхід енергії. При цьому визначається загальна енергія

$$W_{\Sigma} = W_{np} + W_{mp} + W_{hx}, \quad (1.18)$$

де W_{np} – енергія чистої прокатки; W_{mp} – енергія, витрачена на подолання зовнішніх сил тертя в передатних механізмах; W_{hx} – енергія неробочого ходу при відсутності прокатки.

Потім із загальної енергії виключається окрема визначена складова енергії неробочого ходу для придання результатам експерименту універсального характеру. Отримана таким чином енергія $W_{\Sigma, np} = W_{np} + W_{mp}$ ділиться на масу злитка.

За результатами експериментів будують криві питомого розходу енергії (рис.1.10). По вісі абсцис відкладають (зазвичай у логарифмічному масштабі) повний коефіцієнт витяжки, а по вісі ординат – повний питомий розхід енергії.

Використовуючи графік, знаходять питомий розхід енергії на один пропуск

$$\Delta w_i = w_i - w_{i-1}. \quad (1.19)$$

Абсолютний розхід енергії визначається через питомий за формулою

$$A_i = \Delta w_i \cdot m_z, \quad (1.20)$$

де $m_z = \rho F_i L_i$ – маса заготовки, $\rho = 7,8 \text{ т/м}^3$ – питома маса заготовки.

Через формулу (1.20) знаходиться момент $M_{np} + M_{mp}$

$$M_{np} + M_{mp} = \frac{A_i}{\omega_g t_i} = \frac{\Delta w_i \rho F_i D}{2}, \quad (1.21)$$

де $t_i = 2L_i / (\omega_g D)$ – час i -го пропуску, ω_g – кутова швидкість валків.

Таким чином, за формулою (1.21) у кожному пропуску можна знайти відповідні складові моменту на валу двигуна прокатної кліти.

Крива питомих витрат повинна бути вибрана таким чином, щоб характеристики того прокатного стана і умови прокатки, для яких вона була знята, максимально наближалися до характеристик прокатного стана та умов прокатки, для яких ведеться розрахунок. Тобто повинні співпадати тип стана, діаметр робочих валків, тип підшипників, рід змазки, марка ста-

лі металу, який прокатується, температури початку та кінця прокатки. При цьому співпадання маси злитків, початкового та кінцевого перетинів, ширини не обов'язкове. Необхідно, щоб сляб, для якого ведеться розрахунок, відрізнявся від сляба, для якого знята крива питомого розходу енергії, меншим початковим та більшим кінцевим перетином. При цьому розраховується так званий коефіцієнт витяжки умовного проходу $\lambda_{ум}$ як добуток від ділення площі перетину еталонного злитка на площу перетину злитка, для якого ведеться розрахунок. Далі для отримання результатів за кривими питомого розходу енергії на прокатку усі часткові та повні коефіцієнти витяжки домножуються на значення умовного коефіцієнта витяжки $\lambda_{ум}$.

Задача 1.1. Визначення моменту статичного опору на валу двигуна за допомогою кривих питомого розходу енергії на прокатку.

Задано:

Технічна характеристика стана. Максимальний діаметр робочих валків 1050 мм, мінімальний 950 мм, довжина бочки 2600 мм.

Робоча кліть обладнана маніпуляторними лінійками з передньої сторони. Довжина лінійок 5000 мм, хід 2500 мм, швидкість переміщення 0,95 м/с. Лінійки забезпечені рейковим приводом від двох електродвигунів потужністю 66,1-кВт. Ліва лінійка маніпулятора обладнана чотиривалковим пристроєм, що кантує. Хід крюків 600 мм, швидкість кантівки 0,27 м/с. Злитки вагою 5,9...7,4 т прокатують за 9-15 проходів залежно від розмірів блюма. Допускається збільшення кількості проходів і кантування з урахуванням полягання нагрітих злитків. Швидкість прокатки 70 об/хв. Максимальна швидкість прокатки при частоті обертання валів 90 об/хв. Момент інерції 65 т·м². Момент неробочого (холостого) ходу стана дорівнює 30 кНм.

Привод робочих валів від електродвигуна потужністю 10МВт і частотою обертання 0-60-120 об/мин, через шестеренну кліть з діаметром початкового кола шестеренних валів 1197 мм та універсальні шпінделі. Момент інерції 9,5 т·м².

Натискний пристрій верхнього валу електромеханічний з приводом від двох електродвигунів потужністю 80кВт кожний. Швидкість переміщення верхнього валу 75 мм/с. Максимальне переміщення 600 мм. Урівноваження верхнього валу гідравлічне.

Програма прокатки розрахункового сортаменту. Схеми обтиску 7,4-т злитка в блюм перетином 240 x 194 мм наведено в табл. 1.3.

Розв'язання задачі

Розрахунок зручно вести з паралельним заповненням розрахункової таблиці (табл. 1.4). При цьому для прикладу розрахуємо тільки один 3-й прохід (див. табл.1.3). Вносимо в таблицю початкові дані з технічної характеристики стана та програми прокатки (табл.1.3).

Розглянемо технологію прокатки у перших проходах. На прокатку подається злиток перетином 722x722. У першому проході він подається у I-й калібр (рис.1.11) для обтиску на 127 мм (див. табл.1.3). Після проходу товщина злитку стає 595 мм без зміни його ширини (722 мм). Наступний прохід виконується у тому ж I-му калібрі з обтиском 110 мм і кантівкою злитку на 90 градусів після проходу. Таким чином, перетин злитку до кантування стає 485x722, а після кантування – 722x485. Тому у третьому проході виконується обтиск заготовки на 102 мм від перетину 722x485 до перетину 620x550. У наступних 4-му і 5-му проходах заготовка обтискується відповідно на 90 мм і 80 мм, а у 6-му – на 80 мм з подальшим кантуванням на 90 градусів. Далі процес прокатки іде у відповідності з табл.1.3.

Оскільки перетин еталонної заготовки 760x760, для якої побудована крива питомих витрат енергії на прокатку (рис. 1.11), більша від реальної 722x722, то необхідно визначити витрати енергії на так званий умовний прохід для обтиску металу від перетину 760x760 до 722x722

$$\lambda_{ум} = \frac{0,76 \cdot 0,76}{0,722 \cdot 0,722} = 1,11.$$

Режим обтиску 7,4-т злитка перетином 722 x 722 мм із спокійної сталі

Прохід, калібр	Розміри перетину, мм		Обтиск, мм	Прохід, калібр	Розміри перетину, мм		Обтиск, мм
	товщина	ширина			товщина	ширина	
0	722	722		7-II	460	370	90
1-I	595	722	127	8*	370	370	90
2*	485	722	110	9-II	320	370	50
3-I	620	550	102	10*	270	370	50
4	530	550	90	11-IV	280	270	90
5	450	550	80	12*	190	270	90
6*	370	550	80	13-V	240	194	30

* Кантування після проходу.

Таким чином, умовна витяжка перед першим проходом складає 1,11.

Аналіз режиму обтиску заготовки 722x722 показує, що у 1-му проході виконується обтиск металу від перетину 722x722 до перетину 595x722, тобто коефіцієнт витяжки у 1-му проході складає

$$\lambda'_1 = \frac{0,722 \cdot 0,722}{0,595 \cdot 0,722} = 1,213.$$

Аналогічно для 2-го і 3-го пропусків

$$\lambda'_2 = \frac{0,595 \cdot 0,722}{0,485 \cdot 0,722} = 1,223$$

$$\lambda'_3 = \frac{0,722 \cdot 0,485}{0,62 \cdot 0,55} = 1,027.$$

Повний коефіцієнт витяжки з урахуванням умовного для 2-го і 3-го пропусків складає

$$\lambda_{ум,2} = \lambda_{ум} \cdot \lambda'_1 \cdot \lambda'_2 = 1,11 \cdot 1,213 \cdot 1,223 = 1,646,$$

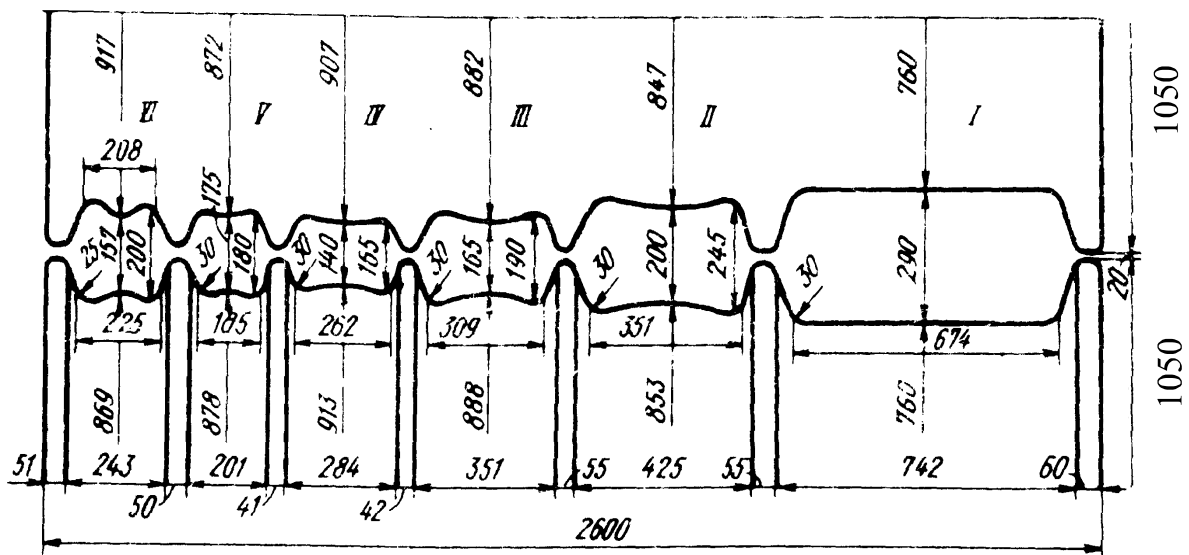


Рис.1.11. Калібр валків

Розрахункова таблиця

№ п/п	Початкові дані	Позначення	Одиниці вимі- ру	Кількісні значення
1	Діаметр робочих валків	D	мм	1050
2	Передаточне число редуктора	i	-	1
3	Товщина полоси до проходу	h_2	мм	722
4	Товщина полоси після проходу	h_3	мм	620
5	Ширина смуги	B_3	мм	485
6	Площа поперечного перерізу після пропуску	F_3	м ²	0,3
7	Питомі витрати енергії для 2-го проходу	w_2	$\frac{\text{квт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$	1,8
8	Питомі витрати енергії для 3-го проходу	w_3	$\frac{\text{квт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$	2,7
9	Питомі витрати енергії за прохід	Δw_3	$\frac{\text{квт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$	0,9
10	Момент прокатки та тертя за 3-й прохід	$\left(M_{pr} + M_{tp} \right)$	кНм	1,11
11	Приведені моменти до валу двигуна	$\left(M_{pr} + M_{tp} \right)'$	кНм	42,5
12	Момент неробочого (холостого ходу)	M_{xx}	кНм	30
13	Статичний момент при прокатці у 3-му проході	M_c	кНм	7984

$$\lambda_{y.m,3} = \lambda_{y.m,2} \cdot \lambda'_3 = 1,646 \cdot 1,027 = 1,694 .$$

Для $\lambda_{y.m,2}$ і $\lambda_{y.m,3}$ з рис.1.12 маємо відповідно

$$w_2 = 1,8 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т},$$

$$w_3 = 2,2 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т},$$

Питомий розхід енергії на 3-й прохід

$$\Delta w_3 = w_3 - w_2 = 0,4 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т}.$$

Абсолютний розхід енергії для 3-го проходу заготовки вагою $m_3 = 7,4 \text{ т}$

$$A_3 = \Delta w_3 \cdot m_3 = 0,4 \cdot 7,4 = 2,96 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Початкова довжина заготовки дорівнює

$$L = \frac{7400 \text{ кг}}{(0,722 \text{ м})^2 \cdot 7800 \text{ кг} / \text{м}^3} = 1,82 \text{ м}.$$

Довжина заготовки після 3-го проходу

$$L_3 = \frac{7400}{(0,62 \cdot 0,55) \cdot 7800} = 2,78 \text{ м}.$$

Вважаючи, що прокатка у 3-му проході виконується на постійній швидкості, з формули (1.21) маємо

$$(M_{np} + M_{mp})_3 = \frac{A_3 D}{2L_3} = \frac{2960 \cdot 1,05}{2 \cdot 2,78} \cdot 3600 = 2012 \text{ кНм.}$$

Разом з моментом неробочого (холостого) ходу маємо

$$(M_{np} + M_{mp})_3 + M_{xx} = 2012 + 30 = 2042 \text{ кНм.}$$

Привод прокатного стана є груповим з передачею моментів обертання на валки кліті через шестеренну кліть. Тому передаточне відношення $i=1$, а статичний момент на валу двигуна у 3-му проході дорівнює

$$M_{c3} = 2[(M_{np} + M_{mp})_3 + M_{xx}] = 2 \cdot 2042 = 4084 \text{ кНм.}$$

Розрахунок інших складових моменту на валу двигуна. Момент тертя визначається силами тертя, які діють під час прокатки у підшипниках валків (M_{mp1}) та у передатних механізмах кліті (M_{mp2}), тобто

$$M_{mp} = M_{mp1} + M_{mp2}. \quad (1.22)$$

Окремо M_{mp} отримують тільки за методикою, яка використовує тиск металу на валки.

Складова M_{mp1} моменту тертя у підшипниках обох робочих валків

$$M_{mp1} = P_{\Sigma} \cdot d_u \cdot f_1, \quad (1.23)$$

де d_u – діаметр цапфи валка; f_1 – коефіцієнт тертя у підшипниках валків (табл.1.3).

Друга складова моменту тертя M_{mp2} визначається за відомою величиною ККД η передатного механізму. Приведена до валу двигуна величина M'_{mp} дорівнює

$$M'_{mp2} = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \frac{M_{np} + M_{mp1}}{i}, \quad (1.24)$$

де i – передатне число.

Таблиця 1.3

Коефіцієнт тертя для деяких типів підшипників

№	тип підшипника	Коефіцієнт тертя
1.	Ковзання з металевими вкладишами: гаряча прокатка холодна прокатка	0,07...0,1 0,05...0,07
2.	Ковзання зі вкладишами з пластмаси	0,01...0,03
3.	Рідинного тертя	0,003
4.	Кочення	0,003

ККД одноступеневої зубчастої передачі у тому випадку, якщо він не заданий, може бути прийнятий рівним 0,96...0,98.

Якщо кліть має, крім робочих, ще й опорні валки, то для визначення моменту тертя слід використовувати формулу

$$M'_{mp} = \frac{M_{mp1}}{i \cdot \eta} \cdot \frac{D}{D_{on}} + \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \frac{M_{np}}{i}, \quad (1.25)$$

де D_{on} – діаметр опорного валка.

Момент неробочого ходу M_{hx} виникає від сил тертя, яке пов'язане з вагою елементів стана, що переміщуються (валки, шпінделі, муфти, шестерні і т.і.)

Приведений до валу двигуна момент неробочого ходу M'_{hx} визначається через моменти неробочого ходу для j -х елементів і може бути записаний

$$M'_{hx} = \sum_{j=1}^n \frac{m_j \cdot g \cdot d_{u,j}}{2 \cdot i_j}, \quad (1.26)$$

де m_j – маса j -го елемента, g – прискорення вільного падіння, $d_{u,i}$ – діаметр цапфи підшипників j -го елемента, i_j – передатне число між валом двигуна та j -м валом передачі.

При відсутності необхідних даних по механічній частині стана, момент неробочого ходу M'_{hx} береться 3...5% від номінального моменту прокатного двигуна.

Після розрахунку моментів прокатки за формулами (1.21), (1.22) та (1.26) для усіх пропусків у відповідності з програмою прокатки будується навантажувальна діаграма і знаходиться еквівалентний момент.

Прокатний двигун вибирається попередньо за умови, що його номінальний момент більший, ніж отриманий еквівалентний момент.

Далі, після попереднього вибору двигуна, стає відомим його момент інерції. Тому можна визначити динамічні моменти привода кліті у кожному пропуску у відповідності з програмою прокатки з урахуванням усіх моментів інерції мас, що обертаються.

Динамічні моменти накладаються на статичну навантажувальну діаграму і уточнюється еквівалентний момент.

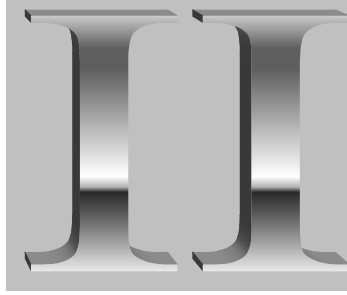
Вибраний двигун перевіряється по уточненому еквівалентному моменту.

Контрольні запитання

1. Які етапи входять у металургійний процес?
2. Яке обладнання називається основним обладнанням прокатного стану і що до нього відноситься?
3. Що відноситься до допоміжного обладнання прокатного стану?
4. Для чого призначені обтискні стани?
5. Який сортамент катають середньолистові стани гарячої прокатки?
6. Який сортамент катають стани холодної прокатки?
7. Скільки валків використовуються у прокатних клітках реверсивних обтискних станів?
8. Скільки валків використовуються у прокатних клітках заготівельних станів?
9. Скільки валків використовуються у прокатних клітках станів холодної прокатки?
10. Які стани мають чорнову і чистову групи клітей?
11. З чого складається робоча прокатна кліть? Призначення її складових.
12. Класифікація прокатних станів.
13. Який тип електродвигунів, в основному, використовується в головних електроприводах станів?
14. В яких механізмах прокатного виробництва, зазвичай, використовуються асинхронні двигуни?
15. В яких механізмах прокатного виробництва переважно використовуються частотно керовані асинхронні електроприводи?
16. В яких приводах металургійного виробництва використовуються синхронні електродвигуни?
17. Для чого збільшується фазність вторинних обмоток трансформатора силової схеми тиристорного перетворювача?
18. Чому нульові схеми включення тиристорів у силовому блоку зустрічаються тільки в малопотужних приводах?
19. Що включає в себе комплектний електропривод?
20. Чим відрізняється тиристорний агрегат від комплектного електропривода?
21. Класифікуйте стани холодної прокатки.
22. Яким вимогам відповідає електропривод постійного струму, що використовується в металургійних агрегатах?

23. Які обмеження накладаються на потужність електропривода постійного струму, що використовується в металургійних агрегатах, і які сучасні способи її підвищення?
24. Якою характерною особливістю відрізняються рольгангові асинхронні двигуни з індивідуальним приводом роликів і чому?
25. За якими ознаками розрізняються силові схеми тиристорних перетворювачів, що використовуються у металургійному виробництві?
26. Що включає в собі силова частина комплектного електропривода?
27. Які типові виконання мають комплектні електроприводи КТЭ?
28. Які основні характеристики частотного електропривода типу ПЧ ВАТ Запорізький завод "Перетворювач"?
29. Які основні типи частотного електропривода випускає корпорація "Тріол" і їх призначення?
30. Які основні типи частотних електроприводів закордонних виробників і їх приклади?
31. Що називається прокаткою, які види прокатки і їх сутність, призначення?
32. Що таке гаряча прокатка і при якій температурі вона відбувається?
33. Що таке холодна прокатка і при якій температурі вона відбувається?
34. Які умови простої прокатки?
35. Що таке пропуск і що здійснюється у процесі пропуску?
36. Що таке витяжка, коефіцієнт витяжки, частковий коефіцієнт витяжки? Надати формули розрахунку.
37. Що таке дуга захвату, зона деформації, нейтральний перетин, нейтральний кут, обтиск, випередження, як визначається випередження, яке його значення?
38. Які умови захвату металу валками? Довести аналітично.
39. Що повинен зробити оператор обтискного стана, якщо заготовка не захвачується валками кліті? Обґрунтувати висновки.
40. Які складові моменту на валу двигуна прокатної кліті?
41. Виконати аналітичні викладки щодо визначення моменту прокатки через тиск металу на валки.
42. Виконати аналітичні викладки щодо визначення моменту прокатки через питомі криві розходу енергії на прокатку.
43. Який розхід енергії на прокатку враховують при визначенні кривих питомого розходу енергії на прокатку?
44. Що знаходять з кривих питомого розходу енергії на прокатку?

45. Що визначається з отриманого значення питомого розходу енергії на прокатку?
46. Надати алгоритм розрахунку потужності двигуна електропривода прокатної кліти і його перевірку.
47. Якими складовими визначається момент тертя в прокатній кліті? Надати аналітичні вирази і пояснити.



ТЕХНОЛОГІЯ ПРОКАТКИ І ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. Реверсивні стани гарячої прокатки

Устрій і технологічний режим роботи реверсивних станів гарячої прокатки. До реверсивних станів гарячої прокатки відносяться усі стани гарячої прокатки, що вимагають реверсування валків. Реверсування забезпечує прокатку металу у декілька пропусків.

Реверсивні стани гарячої прокатки призначені для попереднього обтискання гарячого злитку. В основному це обтискні й заготівельні стани гарячої прокатки; чорнові кліті універсальних, рейкобалкових, крупносортих й листових реверсивних станів гарячої прокатки; реверсивні чистові кліті товстолистових станів гарячої прокатки.

З усіх реверсивних станів гарячої прокатки найбільше значення в прокатному виробництві мають обтискні стани. Тому вони будуть узяті за основу при розгляді характеристик реверсивних станів гарячої прокатки.

Для попереднього обтиску крупних злитків, які надходять зі сталеплавильного цеху, використовують потужні прокатні стани – блюмінги і слябінги.

Блюмінг – прокатний стан, який прокатує заготовку квадратного або близького до нього перетину. Така заготовка називається *блюмом*. Метал, прокатаний на блюмінгу, надходить, за звичай, далі на заготівельні, рейкобалкові, крупносортові стани.

Блюмінги умовно можна розділити на три групи: 1) великі – з діаметром валків 1300...1150 мм; 2) середні – з діаметром валків 1100...1000 мм; 3) малі – з діаметром валків нижче 1000 мм.

Слябінг – обтискний стан, який прокатує заготовку плоского перетину. Така заготовка називається *слябом*. Метал зі слябінга надходить далі до листопрокатних станів.

Основна конструктивна відмінність слябінга від блюмінга – наявність додаткової робочої кліті з вертикальними валками, що встановлена перед кліттю з горизонтальними валками. Вертикальні валки призначені для бокового обтиску металу слябів. Горизонтальні та вертикальні валки у слябінга – гладкі, без калібрів. У блюмінга валки калібровані.

Для реверсивних станів гарячої прокатки використовують два основних варіанта привода робочих валків: а) груповий (рис.1.4, а); б) індивідуальний (рис.1.4,б).

В комплекс реверсивного стана гарячої прокатки крім робочої кліті входять нагрівальні колодязі, злитковози, рольганги, поворотний стіл, кантувач, робочі рольганги, ножиці та інші механізми, що об'єднані загальною технологічною лінією (рис.2.1).

Гарячі злитки доставляються на залізничних платформах зі сталеплавильного цеху до нагрівних колодязів 1, в які вони завантажуються спеціальними кліщовими кранами. Нагріті до температури 1200...1250°C злитки тим же краном виймаються і навантажуються на кільцевий злитковіз 2. На рис.2.1 показані два злитковози, які переміщуються у одному напрямку по кільцю і завантажуються почергово. Завантажений злитковіз зупиняється біля стелажа 4 приймального рольгангу 5. Зіштовхувач 3 зіштовхує злиток на приймальний рольганг 5. Далі злиток надходить на ваги 6, зважується й роликми ваг передається на передній подовжений рольганг 7. Далі він переміщується на передній робочий рольганг 8. На передній лінійці маніпулятора 9 встановлений кантувач 10, який після ряду пропусків кантує заготовку на 90° та подає її у робочу кліть 12 за допомогою станинних роликів 11. Індивідуальний привод валків кліті блюмінга 1300 складає 2×6800 кВт з номінальною кутовою швидкістю двигунів 60/90 об/хв.

Кожний раз перед подачею злитку в робочу кліть оператор за допомогою натискних гвинтів (рис.1.4, поз. 3) змінює положення верхнього робочого валка, встановлюючи необхідний розхил валків. У першому пропуску натискні гвинти піднімають верхній валок до максимального розхилу. Далі оператором виконується вмикання та розгін прокатних двигунів та станинних роликів до швидкості захвату. Злиток подається у валки, приводні двигуни розганяються до максимальної швидкості прокатки в цьому пропуску. Перед кінцем прокатки у кожному пропуску швидкість валків знижується до швидкості викиду злитку з тим, щоб він не був викинутий на значну відстань від кліті. На швидкості викиду злиток викидається з кліті. Натискні гвинти одразу після викиду заготовки переміщують верхній валок вниз для досягнення потрібного розхилу валків у подальшому пропуску. Прокатка злитка у другому та подальших пропусках може починатися після того, як двигун робочих валків закінчив реверс, натискні гвинти закінчують роботу для досягнення необхідного зазору між валками і задній робочий рольганг 14 поверне злиток до кліті.

Через те, що натискні гвинти є повільно діючим приладом порівняно з електроприводом кліті, реверс двигунів кліті виконується швидше, ніж встановлення верхнього валка в потрібне положення. Тому виникає пауза, протягом якої двигун кліті вимкнений. Процес прокатки повторюється у кожному пропуску, однак є певні особливості подальшої прокатки.

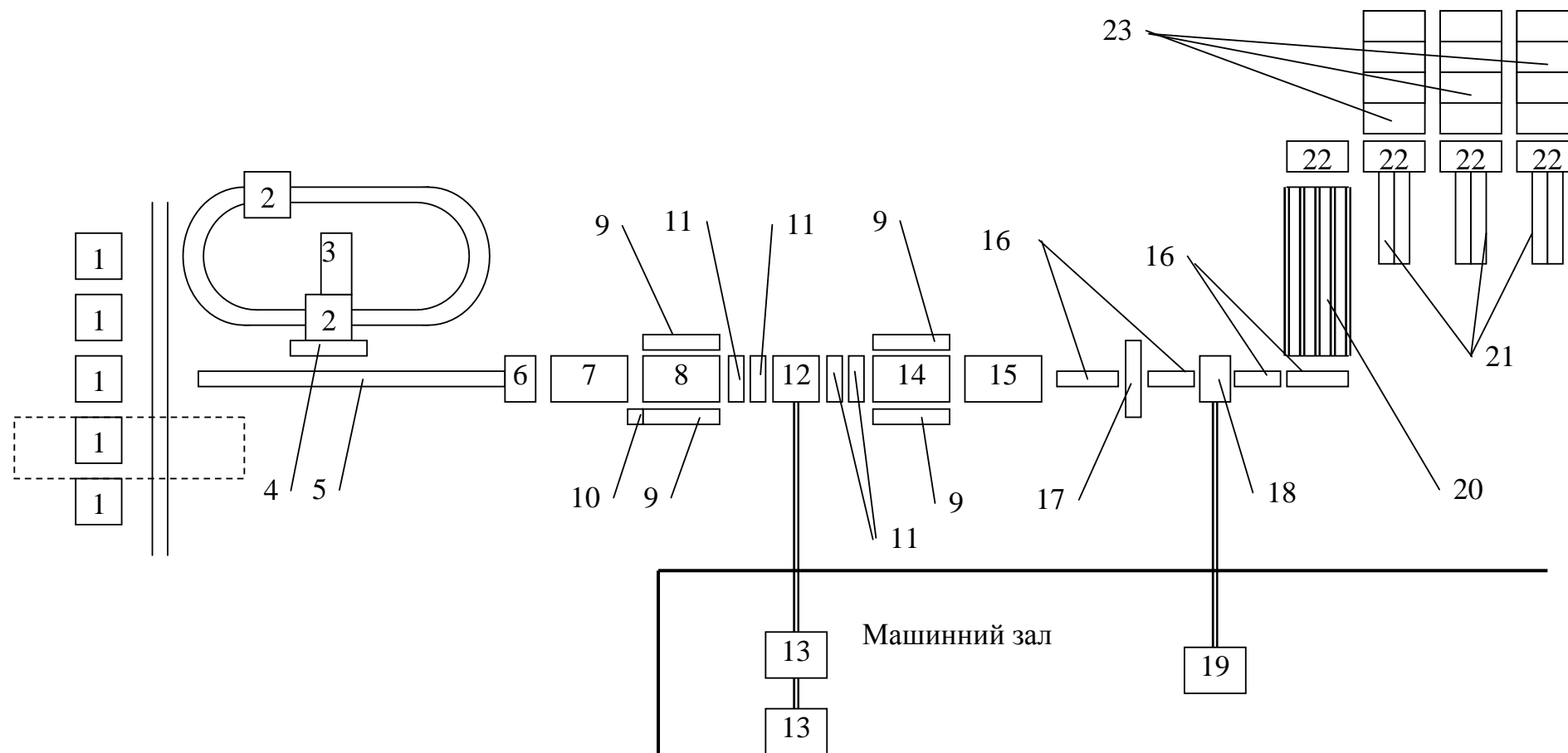


Рис.2.1. План розташування технологічного обладнання блюмінга 1300

В процесі прокатки злиток подовжується, тому для збереження часового циклу прокатки швидкість прокатки збільшується. При необхідності злиток періодично кантується (тобто повертається на кут 90°).

Кількість пропусків при прокатці залежить від початкового та кінцевого перетинів металу і коливається у межах 9...19.

Після закінчення прокатки метал заднім робочим рольгангом 14, подовженим 15 та транспортним 16 рольгангами подається до машини вогневої зачистки 17. За допомогою машини 17 усуваються поверхневі дефекти металу. Далі метал подається до ножиць 18 для обрізки кінців й нарізки на мірну довжину. Після ножиць блюми подаються до ланцюгового транспортера 20, потім до рольгангів, що прибирають 21, звідкіля вони зіштовхуються зіштовхувачами 22 на столи, що штабелюють 23. Від столів блюми надходять до складу блюмів.

Вимоги до електропривода. Режим роботи реверсивних обтискних й заготівельних станів гарячої прокатки, чорнових клітей універсальних, рейкобалкових, крупносортих й листових реверсивних станів гарячої прокатки, реверсивних чистових клітей товстолистових станів гарячої прокатки реверсивний з ударним прикладенням навантаження, частими розгонами, реверсами й зупинками. Частота включень досягає 1000 на годину, для листових станів – 300 на годину. Виходячи з цього та з умов технологічного процесу вимоги до розглянутої групи електроприводів виглядають таким чином:

- 1) забезпечення мінімального часу протікання перехідних процесів пуску, реверсу та зупинки при мінімальних втратах потужності у цих режимах;
- 2) діапазон регулювання швидкості прокатування визначається умовами забезпечення “повзучої” швидкості і складає 25:1;
- 3) не вимагається підвищеної точності підтримки заданої швидкості при збуреннях з боку навантаження, похибка по швидкості може складати 1–2%;
- 4) розгін до основної швидкості повинен забезпечуватися з постійним прискоренням, розгін вище основної повинен виконуватися одним з таких шляхів: постійним прискоренням, постійним динамічним струмом, зниженням динамічного струму пропорційно послабленню поля, тощо;
- 5) число ступенів робочої швидкості – не менше 5-6;
- 6) забезпечення прискорень та гальмувань різного рівня;
- 7) час стояння двигуна під струмом при стопорінні електропривода статичним моментом обмежується до 5-10 секунд;
- 8) висока перевантажувальна здатність двигуна (до 2,5...3);
- 9) в індивідуальному електроприводі вимагається регулювання співвідношення частот обертання між нижнім і верхнім валками до захвату металу та вирівнювання навантаження двигунів при прокатці.

Розрахунок потужності і вибір двигуна. Розрахунок потужності двигуна стана є перевірочним. На основі цього розрахунку виявляється можливість виконання попередньо вибраним двигуном заданої програми прокатки.

Розрахунок потужності виконується за допомогою матеріалу, представленою у першому розділі. При цьому статична навантажувальна діаграма визначається за однією з методик – аналітично, з використанням тиску металу на валки, або за допомогою питомих кривих розходу енергії на прокатку.

Динамічні моменти отримують через тахограми прокатки. У першому наближенні вважається, що у перехідних процесах швидкість двигуна змінюється по прямолінійному закону.

Вихідними даними для розрахунку потужності слугують сортамент, розрахункова продуктивність стана, програма прокатки. Програма прокатки встановлює кількість пропусків, розміри злитків до і після прокатки та обтиски у кожному пропуску, порядок кантування злитка, сорт і температура сталі, діаметр валка у кожному калібрі (див. задачу 1).

Розрахунок виконується за найбільш важкою програмою прокатки, яка характеризується найбільшим значенням добутку повного подовшення металу на максимальну продуктивність з урахуванням числа пропусків на годину.

Розрахунок потужності починається з побудови графіка швидкості. У перших пропусках, коли злиток має невелику довжину, графік швидкості має трикутну форму (рис. 2.2, а). У подальших пропусках через збільшення довжини злитку швидкість прокатки також збільшується (рис. 2.2, б). При значній довжині злитку прокатка виконується на швидкостях, більших номінальної (рис. 2.2, в). При цьому таке підвищення швидкості збільшується за рахунок послаблення поля двигуна. Якщо розгін двигуна виконується з контролем струму, то через зменшення потоку двигуна зменшується динамічний момент і, відповідно, прискорення (рис. 2.2, в). При розгоні двигуна з контролем швидкості і незмінними прискоренням та уповільненням, діаграма швидкості буде трапецевидною, але в зоні швидкості вище номінальної струм двигуна буде більшим від того, який заданий.

Діаграми швидкості (рис. 2.2) мають характерні точки:

n_3 – швидкість захвату металу валками (10...40 об/хв);

n_6 – швидкість викиду (10...40 об/хв, $n_6 > n_3$);

n_0 – стала швидкість прокатки (40...70 об/хв);

n_m – максимальна швидкість прокатки до номінальної;

n'_m – максимальна швидкість прокатки вище номінальної.

Менші значення швидкостей використовуються у перших пропусках, більші – у подальших. В останньому пропуску швидкість викидання дорівнює швидкості прокатки.

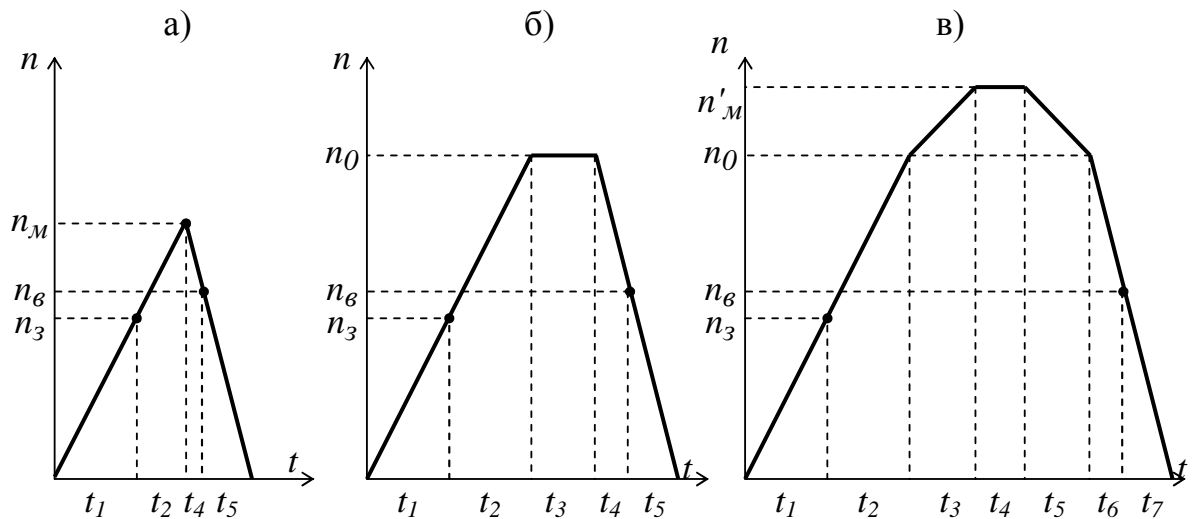


Рис.2.2. Тахограми прокатки
 а) початкової; б) проміжної; в) заключної

Прискорення та уповільнення для електроприводів реверсивних станів гарячої прокатки вибираються виходячи з необхідності отримання заданого часу перехідного процесу при заданому динамічному струмі. За звичай беруть час розгону до основної швидкості n_0 0,7...1,0 с. Динамічний струм приймається 0,5...1,0 від номінального.

При визначених умовах для групового привода прискорення a дорівнює 40...60 (об/хв)/с; уповільнення b складає 50...70 (об/хв)/с. Для індивідуального привода прискорення – 70...100 (об/хв)/с, уповільнення – 80...130 (об/хв)/с.

Час паузи між пропусками визначається часом роботи натискного пристрою й для тахограми береться усередненим 1,5...2,0 с. Якщо передбачається кантування перед подальшим пропуском, середній час паузи складає 2...3,5 с. Час паузи між злитками теж визначається роботою натискних гвинтів, які переміщують верхній валок у найвище положення, і складає у середньому 5...6 с.

Таким чином, у тахограмі невизначеним є лише час прокатки на сталій швидкості прокатки n_0 . На рис. 2.2,б це час t_3 , а на рис. 2.2,в – t_4 . Позначивши час прокатки на сталій швидкості як t_0 , знайдемо його для кожного пропуску через відомі дані тахограми прокатки (рис.2.2,б). Додатково отримаємо:

- кількість обертів валків під час розгону стана від нуля до швидкості захвату у i -му проході $\frac{n_{3,i}^2}{2a_i}$;

- кількість обертів валків під час розгону стана від нуля до сталої швидкості у i -му проході $\frac{n_{0,i}^2}{2a_i}$;

- кількість обертів валків під час уповільнення стана від сталої швидкості до нуля у i -му проході $\frac{n_{0,i}^2}{2b_i}$;
- кількість обертів валків під час уповільнення стана від швидкості викиду до нуля у i -му проході $\frac{n_{e,i}^2}{2b_i}$;
- кількість обертів валків за хвилину під час сталої роботи стана у i -му проході $n_{0,i}t_{0,i}$.
- кількість обертів валків при прокатці заготовки довжиною L_i у i -му проході $\frac{60L_i}{\pi D}$ (коефіцієнт 60 приводить у відповідність розмірності цієї і наведених вище величин);

Усі знайдені величини знаходяться у такому співвідношенні

$$\frac{n_{0,i}^2 - n_{3,i}^2}{2a_i} + \frac{n_{0,i}^2 - n_{e,i}^2}{2b_i} + n_{0,i}t_{0,i} = \frac{60L_i}{\pi D}. \quad (2.1)$$

З формули (2.1) знаходиться час $t_{0,i}$

$$t_{0,i} = \frac{60L_i}{\pi D n_{0,i}} - \left(\frac{n_{0,i}^2 - n_{3,i}^2}{2a_i} + \frac{n_{0,i}^2 - n_{e,i}^2}{2b_i} \right) \frac{1}{n_{0,i}}. \quad (2.2)$$

Аналогічно отримуємо формул для діаграми (рис. 2.2,в)

$$t_{0,i} = \frac{60L_i}{\pi D} - \left[\frac{n_{0,i}^2 - n_{3,i}^2}{2a_i} + \frac{n_{0,i}^2 - n_{e,i}^2}{2b_i} + \frac{n'_m{}^2 - n_{0,i}^2}{2} \left(\frac{1}{a'_i} + \frac{1}{b'_i} \right) \right] \frac{1}{n'_m}, \quad (2.3)$$

де a'_i та b'_i – прискорення та уповільнення при послабленому потоку.

Задача 2.1. За умов задачі 1.1 (див. I-й розділ) розрахувати тахограму прокатки у 3-му пропуску. Вважати розгін від задавача інтенсивності.

Розв'язання задачі. Оскільки привод стана груповий, без редуктора, то приймаємо прискорення $a=40$ (об/хв)/с, а уповільнення $b=50$ (об/хв)/с. Крім того $n_3 = 10$ об/хв, $n_e = 15$ об/хв.

$$\text{Час розгону до швидкості захвату (див. рис.2.2, б)} \quad t_1 = \frac{n_3}{a} = 0,25 \text{ с}$$

$$\text{Час розгону до сталої швидкості} \quad t_1 + t_2 = \frac{n_m}{a} = 1,75 \text{ с}$$

$$\text{Час гальмування від сталої швидкості} \quad t_4 + t_5 = \frac{n_m}{b} = 1,4 \text{ с}$$

$$\text{Час гальмування від швидкості викиду} \quad t_5 = \frac{n_e}{b} = 0,3 \text{ с}$$

Час сталої прокатки (за формулою (2.1) $t_3 = -0,369$ с

Негативний останній результат говорить про те, що прокатки з усталеною швидкості у 3-му пропуску немає, а тахограма є трикутною (рис. 2.2,а), у якій необхідно визначити тільки максимальну швидкість n_m . Для цього знаходимо t_2 або t_4 з рівнянь, що отримані

$$t_2 = 1,75 - 0,25 = 1,5 \text{ с}, \quad t_4 = 1,4 - 0,3 = 1,1 \text{ с}.$$

Тоді

$$n_m = n_3 + a \cdot t_2 = n_6 + b \cdot t_4 = 70 \text{ об/хв}.$$

Як показує результат, після 3-го проходу тахограма буде мати трапецеїдальну форму. Тепер є усі дані для побудування тахограми 3-го проходу.

Особливістю роботи електропривода блюмінгу є робота при послабленому потоку. Якщо виконується рівноприскорений розгін і рівноуповільнене гальмування (рис. 2.2, б), то в зоні послабленого потоку система керування електроприводом забезпечить зростання струму якоря двигуна для підтримки сталості динамічного моменту. Це зростання викликає додаткове нагрівання двигуна від втрат у обмотках. При перевірці двигуна на нагрівання в цьому випадку урахування зростання втрат забезпечується шляхом відповідного збільшення моменту на діаграмі навантаження в зоні послабленні поля на коефіцієнт, що дорівнює відношенню кутової швидкості сталого режиму при послабленні поля до номінальної кутової швидкості двигуна.

Сучасні обтискні стани мають тільки індивідуальний привод валків. Потужність головного привода досягає 12...13 МВт. Напруга двигунів – 750...1000 В, частота обертання 50...65 об/хв, максимальна (при ослабленому потоку) – до 120 об/хв.

2.2. Особливості неперервної прокатки

Неперервна прокатка гарячого металу, незалежно від того, на якому стані він прокатується (заготівельний, листовий, сортовий та ін.), має загальні особливості: 1) одночасну прокатку металу у всіх клітях неперервної групи й зв'язок між клітями через метал, що прокатується; 2) ударне прикладення й скидання навантаження при повній робочій швидкості.

Одночасна прокатка металу у всіх клітях. Основною умовою неперервної прокатки є сталість секундного об'єму металу по клітям. Тобто, через кожну кліть у одиницю часу проходить одна й таж кількість металу. Умови сталості секундного об'єму металу записується як

$$F_1 \vartheta_1 = F_2 \vartheta_2 = F_3 \vartheta_3 = \dots = F_n \vartheta_n, \quad (2.4)$$

де $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ – перетин металу перед входом у відповідну кліть;

$\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \dots, \vartheta_n$ – швидкість руху металу перед входом у кліть.

Якщо припустити, наприклад, що $F_2\vartheta_2 > F_3\vartheta_3$, то на ділянці між другою й третьою клітками відбудеться розрив смуги металу. Якщо $F_2\vartheta_2 < F_3\vartheta_3$, то на ділянці між другою й третьою клітками виникне петля.

У сталому режимі прокатки, виходячи з умови (2.4), завжди виконується рівняння

$$F_{вих,1}\vartheta_{вих,1} = F_{вх,2}\vartheta_{вх,2},$$

де $F_{вих,1}$, $\vartheta_{вих,1}$ – відповідно перетин металу і його лінійна швидкість після виходу з попередньої клітки;

$F_{вх,2}$, $\vartheta_{вх,2}$ – відповідно перетин металу і його лінійна швидкість перед входом у наступну клітку.

Якщо припустити, що $F_{вих,1} = F_{вх,2}$, то

$$\vartheta_{вих,1} = \vartheta_{вх,2}. \quad (2.5)$$

Візьмемо у неперервній групі дві суміжні клітки (рис.2.3).

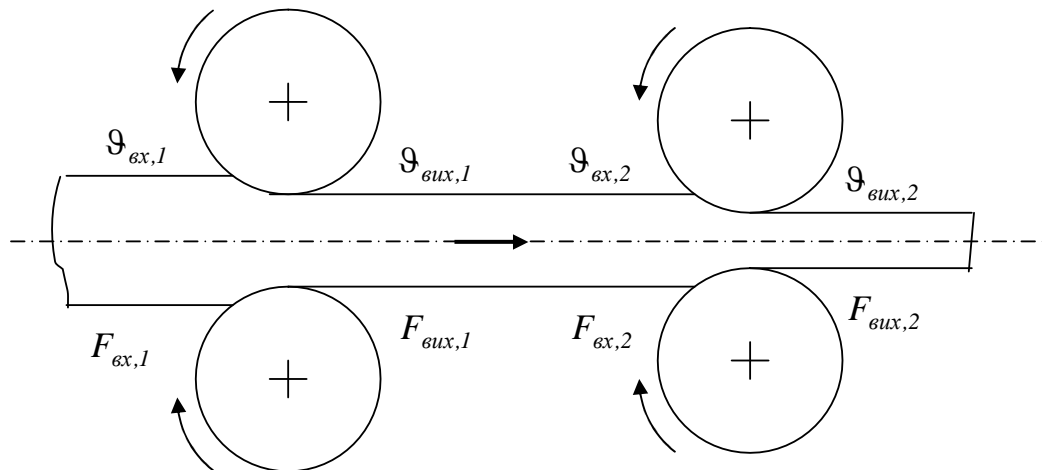


Рис.2.3. Прокатка у неперервному стані

Розглянемо випадок, коли зв'язок між валками суміжних клітей відсутній, тобто відсутні натяг й стиск металу. Тоді, з урахуванням випередження металу за формулою (1.4)

$$\vartheta_{вих,1} = D_1\omega_1(1 + S_1)/2, \quad (2.6)$$

$$\vartheta_{вих,2} = D_2\omega_2(1 + S_2)/2, \quad (2.7)$$

де S_1 , S_2 – відповідно випередження металу у першій й другій клітках.

Враховуючи $F_{вих,1} = F_{вх,2}$ і $D_1 = D_2$, з (2.4), (2.6), (2.7), маємо

$$b = \frac{\omega'_2}{\omega_1} = \frac{(1 + S_1)\lambda_2}{1 + S_2}, \quad (2.8)$$

де $\lambda_2 = F_{\text{вх},2} / F_{\text{вих},2}$ – коефіцієнт витяжки; ω'_2 – кутова швидкість валків другої кліті у режимі вільної прокатки.

Таким чином, співвідношення швидкостей першої та другої кліті (2.8) забезпечує *режим вільної прокатки*, коли метал не відчуває зусиль стиску або натягу. Такий режим є нестійким, граничним між прокаткою з натягом й прокаткою зі стиском (або утворенням петлі) і не може підтримуватися довго. Тому в залежності від технології прокатку ведуть або з натягом, або зі стиском (або петлею).

Прокатка металу з натягом. При наявності натягу швидкості виходу металу з валків першої кліті (див. формулу (2.6)) і входу металу у другу кліть змінюються

$$\vartheta_{\text{вих},1} = D_1 \omega_1 (1 + S_1 + \psi T) / 2, \quad (2.9)$$

$$\vartheta_{\text{вх},2} = \vartheta_{\text{вих},2} / \lambda_2 = D_2 \omega_2 (1 + S_2 - \psi T) / (2\lambda_2), \quad (2.10)$$

де ψT – випередження, обумовлене зусиллям натягу; ψ – коефіцієнт пропорційності; T – величина натягу; S_1, S_2 – випередження без урахування натягу.

Таким чином, зусилля натягу T у проміжку між клітьми забезпечується певним співвідношенням швидкостей металу у сусідніх клітьх. Для цього відповідно збільшується вихідна швидкість металу з валків першої кліті і зменшується швидкість входу металу у валки другої кліті. Така зміна лінійних швидкостей металу можлива за рахунок зміни співвідношення кутових швидкостей сусідніх клітей ω_2 / ω_1 . З урахуванням (2.9), (2.10) та $F_{\text{вих},1} = F_{\text{вх},2}$ і $D_1 = D_2$, маємо

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \delta \cdot b = \frac{(1 + S_1 + \psi T)\lambda_2}{1 + S_2 - \psi T}, \quad (2.11)$$

де δ – коефіцієнт зміни співвідношення кутових швидкостей сусідніх клітей.

З порівняння формул (2.8) і (2.11) видно, що при прокатці з натягом $\delta > 1$. У цьому випадку цей коефіцієнт називають *коефіцієнтом натягу*. Якщо $T = 0$ (вільна прокатка), формула (2.11) вироджується у формулу (2.8), тобто при вільній прокатці $\delta = 1$.

Прокатка металу з підпором (петлеутворенням). При зменшенні співвідношення кутових швидкостей сусідніх клітей ω_2 / ω_1 по відношенню до формули (2.8), зменшується швидкість входу металу у другу кліть. У зв'язку з цим між клітьми з'являється залишок металу і вини-

кають у разі значного перетину металу зусилля підпору. При малому перетині металу з'являється петля. У цьому випадку формули швидкості виходу металу з валків першої кліті і входу металу у другу кліть мають вигляд

$$\mathfrak{V}_{вих,1} = D_1 \omega_1 (1 + S_1 - \psi T) / 2, \quad (2.12)$$

$$\mathfrak{V}_{ех,2} = \mathfrak{V}_{вих,2} / \lambda_2 = D_2 \omega_2 (1 + S_2 + \psi T) / (2\lambda_2). \quad (2.13)$$

З урахуванням (2.12), (2.13) та $F_{вих,1} = F_{ех,2}$ і $D_1 = D_2$, маємо

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \delta \cdot b = \frac{(1 + S_1 - \psi T) \lambda_2}{1 + S_2 + \psi T}. \quad (2.14)$$

З порівняння формул (2.8) і (2.14) видно, що при прокатці з підпором $\delta < 1$. У цьому випадку цей коефіцієнт називають *коефіцієнтом підпору*.

Зусилля підпору, що виникають при зменшенні співвідношення кутових швидкостей відносно існуючого співвідношення (2.14), викликають зменшення випередження у першій кліті й збільшення випередження у другій кліті. Цей процес призводить до вирівнювання лінійних швидкостей $\mathfrak{V}_{вих,1}$ і $\mathfrak{V}_{ех,2}$ металу. Коли ці швидкості стануть рівними, зріст зусиль стиску припиниться. Перехідний процес зміни співвідношення кутових швидкостей сусідніх клітей закінчиться при іншому значенні зусиль натягу T .

Якщо перетин металу невеликий, при співвідношенні кутових швидкостей (2.14) можливе створення петлі. Зміна співвідношення кутових швидкостей у цьому випадку призведе до неперервного збільшення петлі через відсутність зусиль, які вирівнюють лінійні швидкості металу $\mathfrak{V}_{вих,1}$ і $\mathfrak{V}_{ех,2}$. Тому, при такій прокатці петля не залишається незмінною. Розміри петлі не повинні виходити за задані межі, інакше порушується нормальний процес прокатки. З метою підтримання заданої довжини петлі виконується автоматичне підрегулювання швидкостей робочих клітей. Для низькошвидкісних неперервних станів таке підрегулювання можливо виконувати вручну.

Ударне прикладення навантаження. Процес неперервної прокатки передбачає одночасне знаходження металу у всіх клітях стана неперервної прокатки. На початку прокатки виконується почергова заправка металу у валки кожної кліті. Захват металу у валки може виконуватися на швидкості, рівній швидкості прокатки (наприклад, у сортових станах), або на швидкості захвату, яка менша за швидкість прокатки (наприклад, у ширококутових станах гарячої прокатки). Якщо швидкість прокатки невисока (до 8...10 м/с), то швидкість заправки дорівнює швидкості прокатки. Якщо швидкість прокатки більш ніж 18...20 м/с, то швидкість заправки складає 8...10 м/с. У ширококутових станах гарячої прокатки до того ж виконується заправка листа металу у намотувальний пристрій, що знахо-

диться за станом. Після цього виконується розгін стана до швидкості прокатки.

При вході метала у валки виникає ударне прикладення навантаження на вал двигуна. В залежності від співвідношення електромагнітної й електромеханічної сталої часу електропривода кліті характер перехідного процесу зміни швидкості і струму двигуна буде аперіодичним або коливальним.

Характер перехідних процесів при ударному прикладенні навантаження має важливе значення для неперервної прокатки, тому що неузгодженість кутових швидкостей обертання валків клітей може викликати неприпустимі коливання зусиль натягу, стиску, довжини петлі (рис. 2.4).

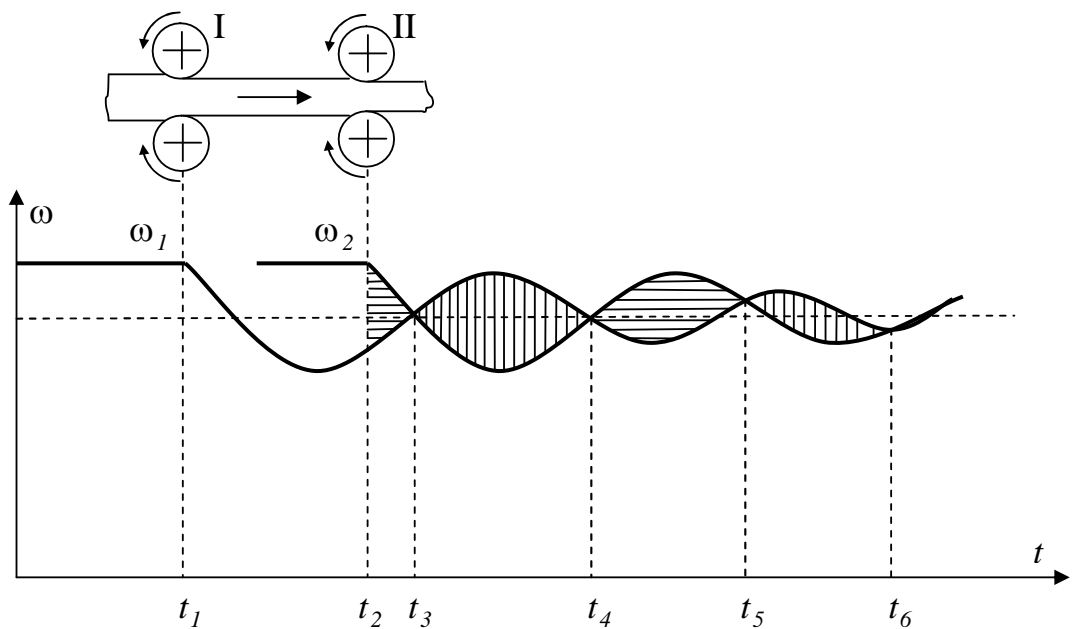


Рис.2.4. Графіки зміни швидкості двох суміжних клітей при входженні металу у валки

У момент часу t_1 метал входить у кліть 1, й швидкість двигуна цієї кліті починає зменшуватися. У момент часу t_2 метал входить у другу кліть 2. У цей момент $\omega_2 > \omega_1$ і присутній натяг металу у міжклітьовому проміжку, що відповідає співвідношенню кутових швидкостей за формулою (2.11). Починаючи з моменту часу t_3 , швидкість $\omega_1 > \omega_2$, що відповідає умові (2.14), тобто прокатці з петлею або підпором. Далі процес зміни кутових швидкостей клітей повторюється коливально. На рис.2.4 зона натягу показана горизонтальним штрихуванням, а зона підпору (петлеутворення) – вертикальним штрихуванням.

Зміна режимів прокатки з розтягуванням й стиском призводить до різнотовщинності металу, а у випадку досить значних неузгодженостей швидкостей – до розриву та зминання металу. Тому необхідно прагнути

зменшити величину динамічного та статичного перепаду швидкостей та часу перехідних процесів.

2.3. Неперервні стани гарячої прокатки

Устрій і технологічний режим роботи неперервних тонколистових станів гарячої прокатки. Тонколистові широколистові стани мають дві групи робочих клітей – чорнову й чистову (рис. 2.5).

З нагрівальних печей 1 сляби надходять за допомогою рольганга 2 до чорнового окалиноламача 3. Він представляє собою двохвалкову кліть, в якій відбувається невеликий (до 5%) обтиск металу з метою руйнування шару окалини. Далі метал прокатують у чорновій групі клітей 4. В чорновій групі виконується попередній обтиск сляба до товщини 20...25 мм. Кількість чорнових клітей не менше 5...6. Конструкція чорнової групи виконується за двома варіантами.

За першим варіантом робочі кліті розташовані одна від одної на відстані, більшій, ніж довжина злитка. Тому прокатка у цьому випадку виконується окремо при незмінному напрямку руху металу. Останні 2...3 кліті можуть об'єднуватися у неперервну групу.

За другим варіантом чорнова група має одну або дві реверсивні кліті. Прокатка виконується при прямому й зворотному напрямках.

Листові стани з першим варіантом конструкції чорнової групи називаються *неперервними* (рис. 2.5), а з другим варіантом – *напівнеперервними*.

У складі чорнових груп використовують двох- й чотиривалкові кліті.

Після чорнової групи метал потрапляє на проміжний рольганг 2, а далі надходить на летючі ножиці 8, чистовий окалиноламач 9 і далі – на чистову групу робочих клітей 10. Число клітей в чистовій групі досягає 8...9. Кліті розташовані на відстані 5,5 м одна від одної. У чистовій групі метал прокатується одночасно у всіх клітях. Далі у спеціальній установці металева смуга охолоджується й змотується у рулони на моталках.

Валки окалиноламачів й прокатних клітей приводяться до обертання від двигунів 6 через редуктори 5. При груповому приводі валків клітей використовується шестеренна кліть за кінематичною схемою (рис. 1.5).

Величина обтиску смуги встановлюється шляхом переміщення натискних гвинтів. Вони використовуються також в автоматизованій системі регулювання товщини й натягу смуги. При цьому у міжклітьових проміжках встановлюються петлеутримувачі, які виконують контроль величини натягу.

Прокатка у чистових клітях ведеться з прискоренням, що сприяє вирівнюванню температури смуги, яка має тенденцію до зниження в напрямку кінця смуги.

Устрій і технологічний режим роботи сортових станів. Сортіві стани призначені для прокатки профілів різних розмірів та форм.

За розташуванням клітей сортіві стани діляться на лінійні, послідовні, зигзагоподібний або шахматні, напівнеперервні (рис.2.6) та неперервні (рис.2.7).

Крупносортові стани будуються в основному напівнеперервними (рис.2.6). Швидкість прокатки до 10 м/с. Прокатка складного профілю проходить без зусиль стиску або натягу.

Схема напівнеперервного стана використана для середньосортного стана 550 металургійного заводу ім. Петровського (м. Дніпропетровськ). Стан призначений для прокатки автоободів, автовісей, коленвалів, автопелетель, лемешної смуги.

Згідно зі схемою злитки надходять за допомогою рольгангів 11 у печі 12, підігріваються до необхідної кондиції й направляються у обтискну реверсивну кліть дуо 1 з потужністю двигуна головного привода 2500 кВт й кутовою швидкістю 110/220 об/хв. Далі іде неперервна група з двох нереверсивних клітей дуо 2 (1530 кВт, 68/138 об/хв) і 3 (2100 кВт, 92/184 об/хв), де прокатка виконується одночасно. Після цього заготовка надходить у нереверсивну кліть дуо 4 з потужністю двигуна 2100 кВт й кутовою швидкістю 92/184 об/хв, яка стоїть окремо.

Розташування обладнання стана 550, що розглядається, передбачає зміну напрямку прокатки для більш компактного розташування обладнання. Після четвертої кліті заготовка змінює напрямок руху на протилежний і надходить у неперервну нереверсивну групу клітей 5 і 6 (2500 кВт, 110/220 об/хв).

Далі у напрямку прокатки знаходяться дві кліті 7 і 8. Кліть 7 стоїть окремо і є нереверсивною. Прокатка в ній виконується окремо від попередньої групи клітей. Потужність двигуна головного привода кліті складає 2500 кВт, кутова швидкість 110/220 об/хв.

Нереверсивна кліть 8 вважається чистою й має суміщену робочу лінію з кліттю для прокатки періодичних профілів. При прокатці автоободів, швелерів, куточків й інших профілів в робочу лінію встановлюється кліть №8 (4000 кВт, 110/220 об/хв). При прокатці періодичних профілів кліть №8 прибирається краном й замість неї встановлюється кліть для прокатки періодичних профілів.

Найбільш досконаліми є неперервні сортіві стани, не зважаючи на труднощі неперервної прокатки без зусиль стиску або натягу. Переваги неперервних станів пов'язані з більшою продуктивністю, меншим розходом енергії та кращою якістю прокатки через менше остигання металу, більшу компактність стана.

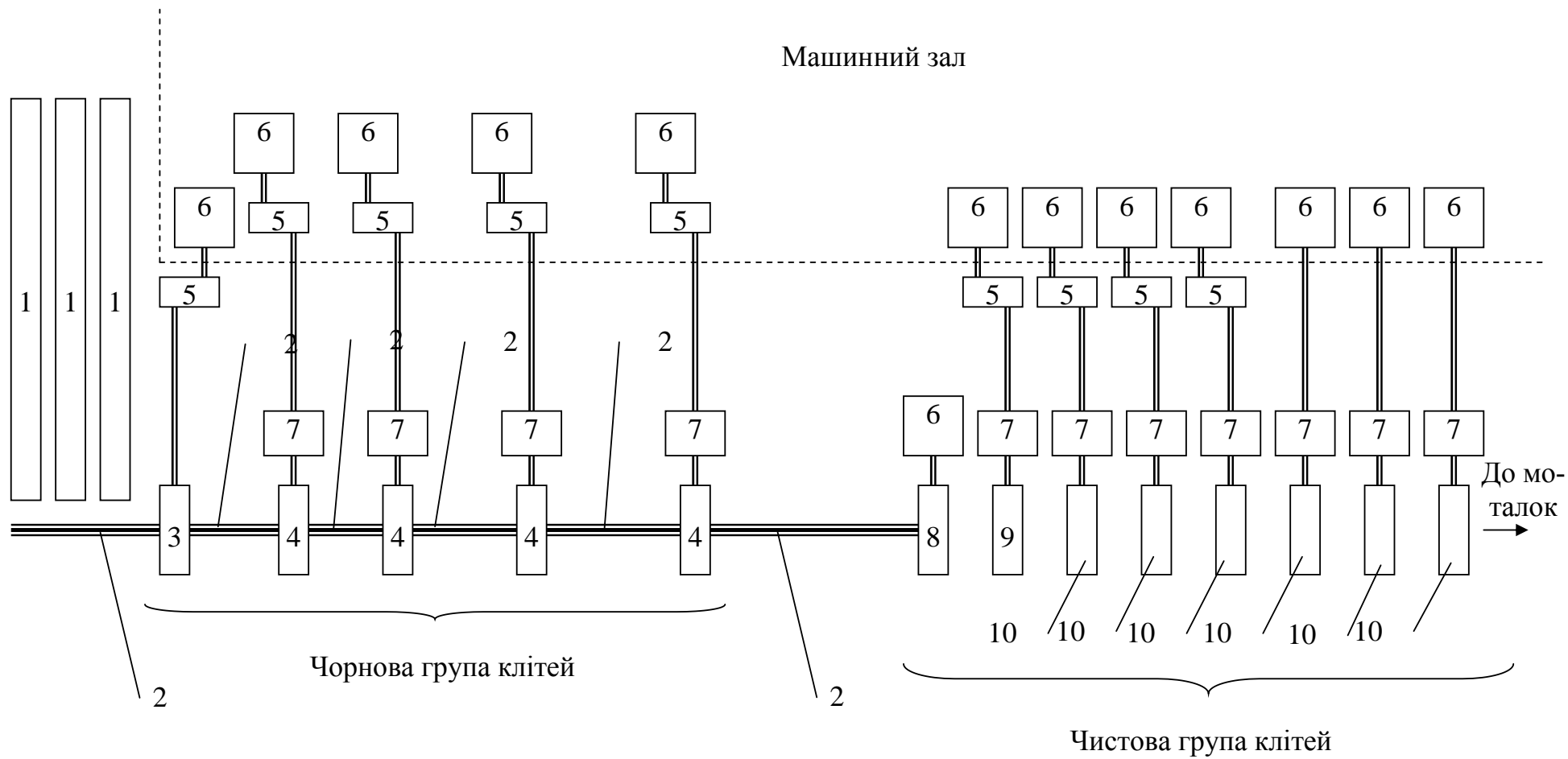


Рис.2.5. Схема розташування обладнання неперервного широкосмугового стана гарячої прокатки

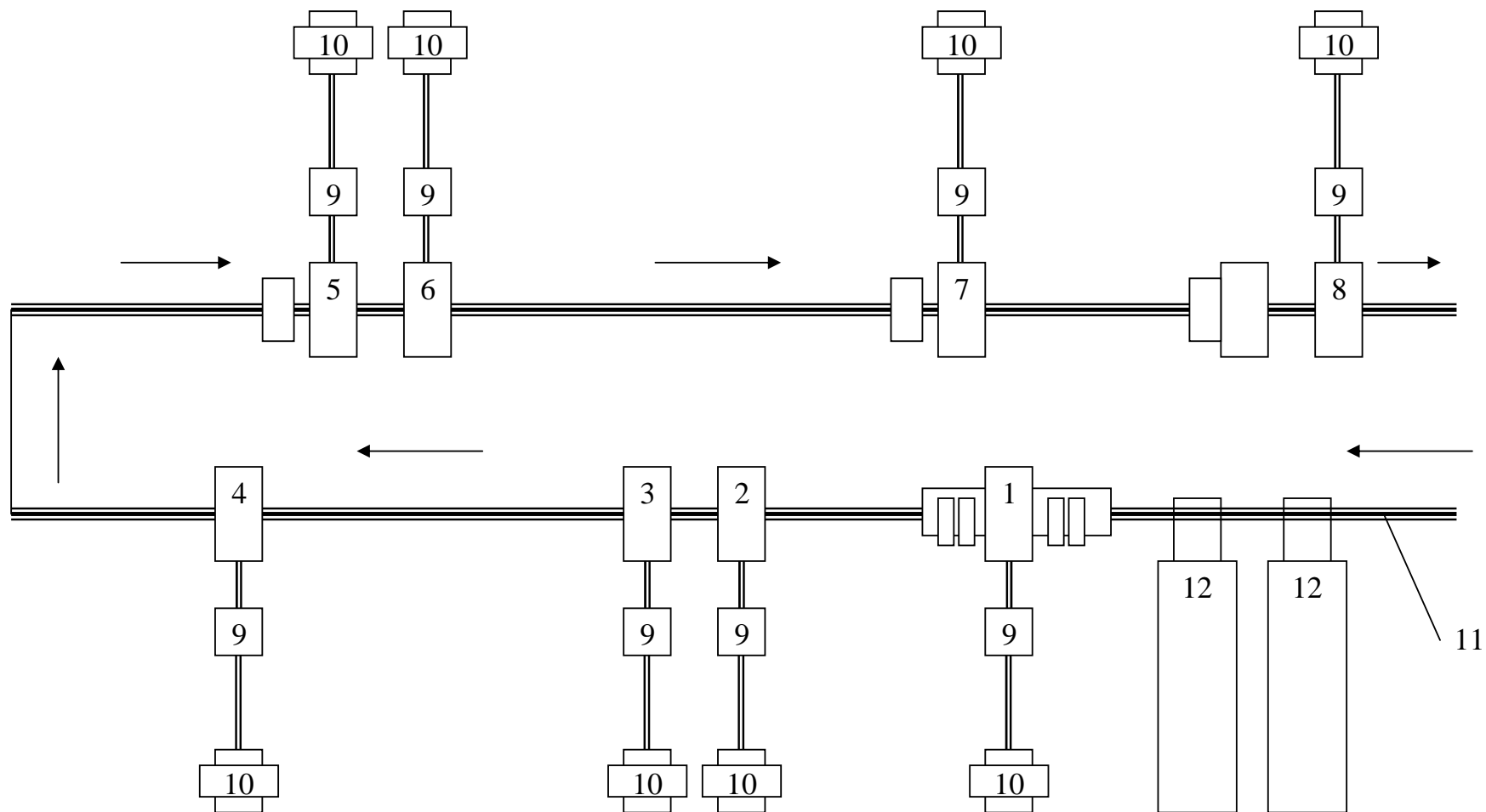


Рис. 2.6. Схема розташування клітей напівнеперервного середньосортного стану 550

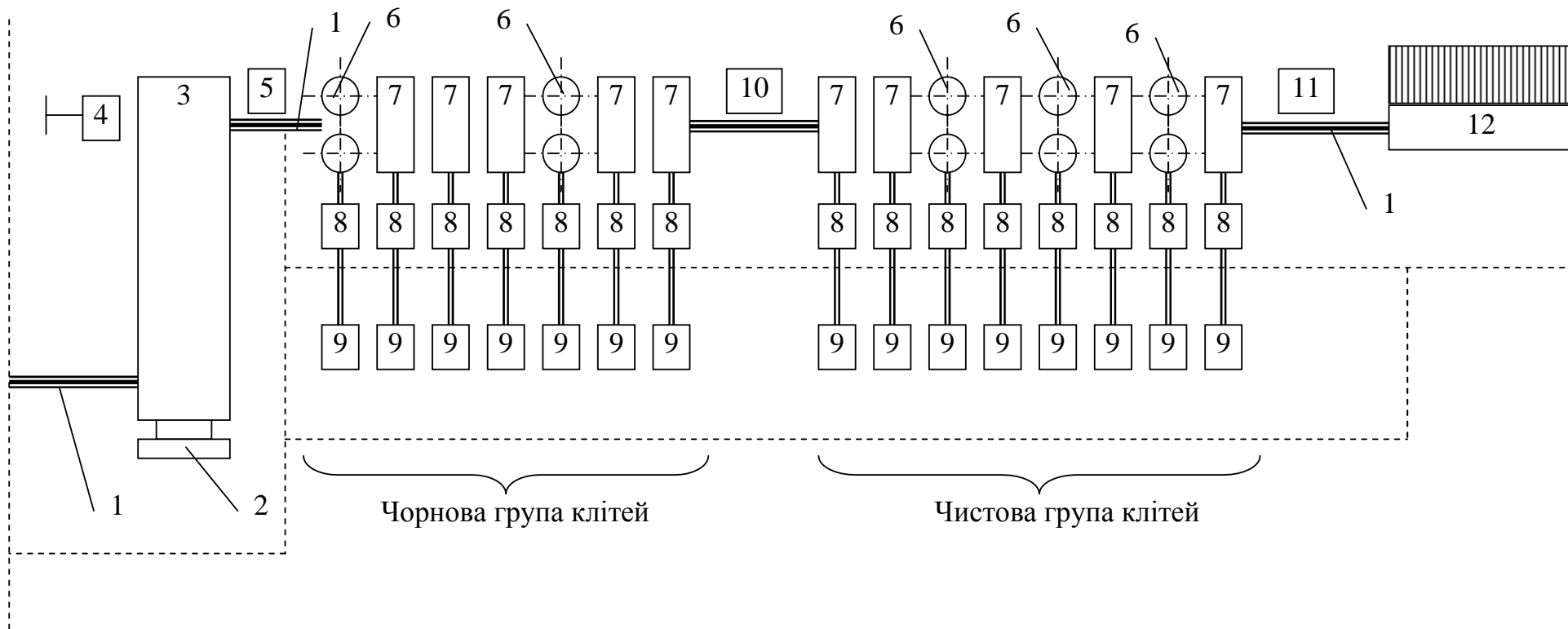


Рис.2.7. Схема розташування обладнання неперервного сортового стану 330

Середньосортові й дрібносортові неперервні стани можуть виконуватися як у одну, так і у декілька ниток, тобто коли у одній кліті одночасно може знаходитися декілька заготовок. Ці стани складаються з 8...27 робочих клітей з горизонтальними й вертикальними валками. Вихідна швидкість складає 15...35 м/с.

Широко розповсюджені неперервні дрібносортові стани, які мають неперервну чорнову з семи клітей та неперервну чистову групи клітей з восьми клітей (рис.2.7). Кліті 6 мають вертикальне розташування валків, а кліті 7 – горизонтальне. Привод клітей виконується через шестеренні кліті 8 від двигунів 9.

Метал по підводному рольгангу 1 печі за допомогою печного зіштовхувача 2 надходить у піч, де нагрівається до необхідної температури. Потім виштовхувач 4 надсилає злиток на рольганг, де за допомогою ножиць 5 виконується обрізка кінців металу.

Метал при прокатці знаходиться одночасно у чорновій та чистовій групі клітей. Захват металу відбувається на повній швидкості прокатки. Максимальна швидкість прокатки складає 13...15 об/хв. Після кожної групи клітей виконується обрізка кінців металу ножицями 10 і 11.

Далі готовий сортамент за допомогою приймального рольгангу 12 надходить до холодильників.

Устрій і технологічний режим роботи дротових станів. Дротові стани складаються з декількох неперервних груп з загальною кількістю клітей 15...40 (рис. 2.8). Між окремими неперервними групами за звичай встановлюють ями для петлі, в яких метал збирається у вигляді петель для виключення впливу груп одна на одну. Прокатка у чорнових та проміжних групах відбувається у 2...4 нитки одночасно, для чого у валках є 2...4 калібри. У чистових клітях прокатка ведеться у одну нитку. Швидкість прокатки досягає 25...40 м/с.

Прокатка дроту ведеться з незначним натягом. Неприпустиме створення петлі у міжклітьовому проміжку.

Устрій і технологічний режим роботи заготівельних станів. На неперервних заготівельних станах виконується прокатка заготовок для сортових, трубних, дротових станів. Вихідним матеріалом для заготівельних станів слугують блюми перетином 300×300 мм або 370×370 мм. Кінцевий перетин від 50×50 до 200×200 мм. Кінцевий перетин заготовки не є остаточним й має просту форму – квадрат, прямокутник.

Неперервні заготівельні стани складаються з однієї, двох або трьох груп неперервних клітей, розташованих послідовно на відстані 60...80 м. Крупні заготовки прокатуються тільки у першій групі, а дрібні – у всіх.

Для бокового обтиску заготовки використовують кліті з вертикальним розташуванням валків. Захват металу відбувається на повній швидкості. Максимальна швидкість прокатки складає 5...6 м/с. За звичай зміна швидкості валків робочих клітей не вимагається. Стан налагоджується на прокатку з незначним натягом $\delta = 1,01...1,03$.

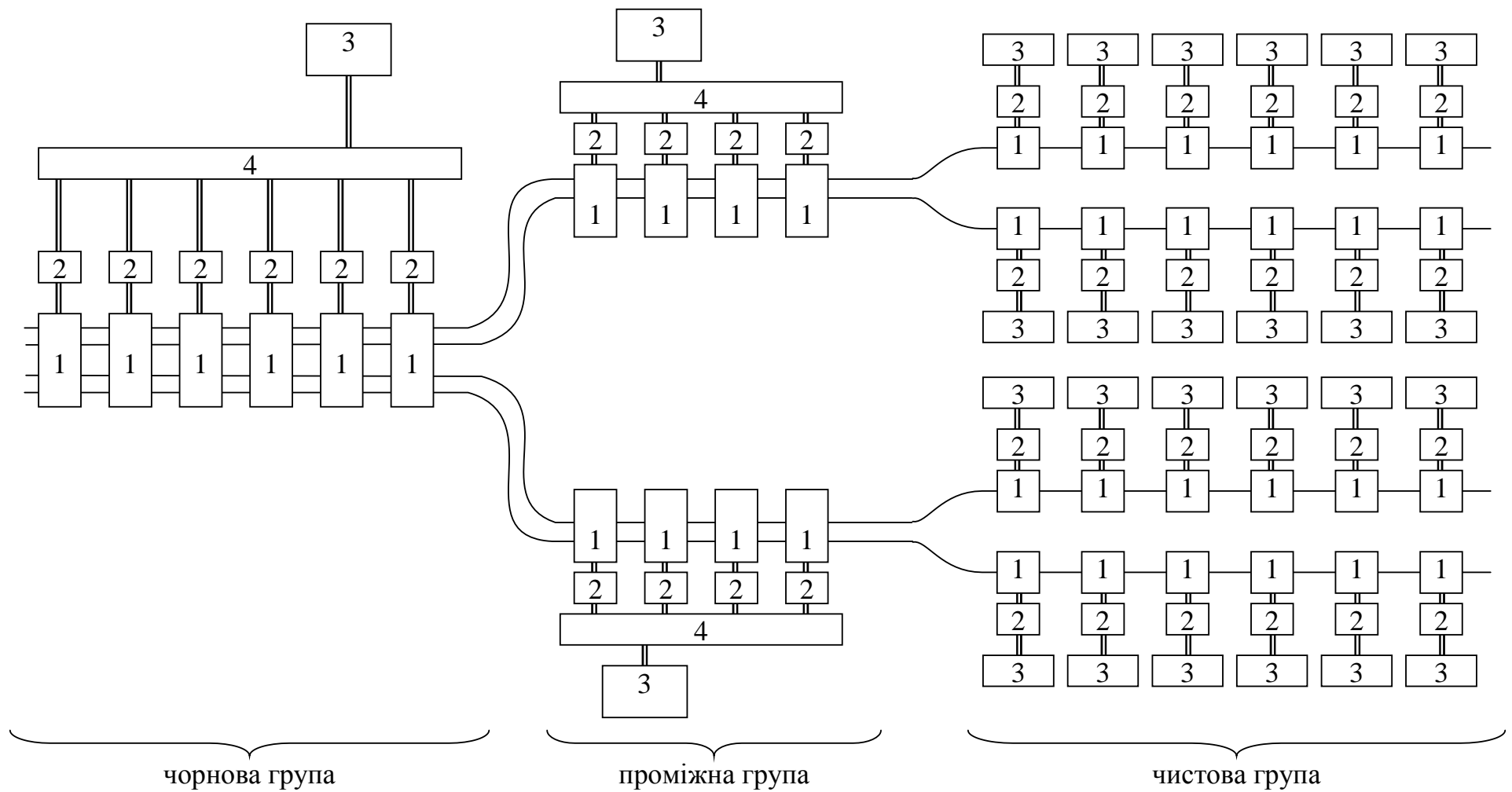


Рис.2.8. Схема розташування обладнання неперервного дротового стану
 1 – розмотувач; 2 – летючі ножиці; 3 – зварювальна машина; 4 – пересувний петлеукладувач

Вимоги до електропривода. Головні електроприводи чорнових клітей неперервних сортових (середньосортних, мілкосортних) й листових станів гарячої прокатки; прошивних, розкатних й пілігримових станів трубопрокатних агрегатів й чистових нереверсивних клітей універсальних рейко-балкових станів:

- 1) відсутня необхідність строгого підтримання заданого співвідношення частот обертання валків суміжних клітей;
- 2) нечасте регулювання швидкості;
- 3) відсутні вимоги щодо точності регулювання частоти окремих клітей;
- 4) відсутні вимоги щодо точності відновлення швидкості при ударному прикладенні навантаження.

Головні електроприводи чистових клітей неперервних заготівельних, сортових, листових станів гарячої прокатки; неперервних калібровочних та редуційних станів трубопрокатних агрегатів:

- 1) жорсткі вимоги до синхронізації швидкостей обертання валків декількох клітей, які пов'язані металом, що прокатується;
- 2) динамічний перепад швидкості при ударному прикладенні навантаження до (0,5...2)% з відновленням за час не більше 0,1...0,3 секунди;
- 3) статичний перепад швидкості до (0,1...0,5)%;
- 4) діапазон регулювання частоти обертання до (3,5...2):1;
- 5) плавне регулювання швидкості для настроювання стана на прокатку;
- 6) наявність "повзучої" швидкості до 10% для заміни валків і ремонту клітей;
- 7) спеціальні вимоги до якості перехідних процесів при розгоні та гальмуванні не пред'являються.

Головні електроприводи чистових клітей неперервних тонколистових станів гарячої прокатки.

Вимоги до електропривода аналогічні вимогам до електропривода попередньої групи станів. Додатково висуваються умови:

- 1) можливість зміни співвідношення швидкостей валків клітей для забезпечення заданої зміни натягу у сталих й перехідних режимах роботи;
- 2) спільне й роздільне керування клітями й моталкою;
- 3) отримання любой заправної швидкості;
- 4) забезпечення неперервного одночасного прискорення усіх клітей стана під час прокатки;
- 5) забезпечення рекуперації для швидкого зниження швидкості від максимальної до швидкості захвату;
- 6) гальмування кожного привода кліті при виході смуги із даної кліті.

Головні електроприводи клітей чистової групи дротових станів:

- 1) жорсткі вимоги до синхронізації швидкостей обертання валків декількох клітей, які пов'язані металом, що прокатується;

- 2) динамічний перепад швидкості при ударному прикладенні навантаження до $(0,5 \dots 2)\%$ з відновленням за час не більше $0,1 \dots 0,3$ секунди;
- 3) статичний перепад швидкості до $(0,1 \dots 0,2)\%$;
- 4) діапазон регулювання частоти обертання до 4:1;
- 5) плавне регулювання швидкості для настроювання стана на прокатку.

2.4. Стани холодної прокатки

Прокатка тонкої сталюї смуги менше 1 мм можлива тільки при холодній обробці металу. Це пояснюється тим, що тонка смуга у гарячому стані має малу міцність і, крім того, окалина, яка створюється у процесі нагріву металу у печах, порівнянна з товщиною металевої смуги. Це не дозволяє вести стійку прокатку з отриманням високої якості поверхні й структури металу.

Усі стани холодної прокатки діляться на неперервні або багатоклітьові (рис.2.9) й реверсивні або одноклітьові (рис.2.10).

Технологічний процес виробництва холоднокатаного листа включає за звичай такі операції: очищення поверхні смуги, що призначена для прокатки, від окалини й іржі; холодну прокатку; термічну обробку холоднокатаного листа з метою поліпшення його фізико-механічних якостей; додаткову холодну прокатку після термообробки з невеликим обтиском (дресировку) для забезпечення поверхневої міцності металу; кінцеву обробку – правку, різку, обрізку кромки і т.і.

Холодна прокатка повинна виконуватися з натягом смуги між клітьми. Відсутність натягу може призвести до аварій, зниження якості металу тощо. Тому крім робочих клітей, де виконується основна операція – обтиск металу, стан має моталки та розмотувачі.

Абсолютна величина питомого натягу теоретично може досягати межі плинності. Однак за звичай використовують питомі натяги, які не перевищують $50 \dots 60\%$ від межі плинності.

Неперервні стани холодної прокатки мають від 3 до 6 клітей, які розташовані послідовно (рис.2.8, поз. 5). Збільшення числа клітей дає можливість прокатувати більш тонку смугу при одній і тій же початковій товщині, використовувати більш товстий прокат, зменшувати обтиск в одній кліті. Це дозволяє підвищити продуктивність й якість готової продукції. Кліті неперервних станів виконують чотиривалковими.

Три- й чотиріклітьові стани використовують за звичай для прокатки твердих сталей (трансформаторні, автосталі й ін.), а п'яти-шестиклітьові – для прокатки м'яких сталей (жерсть, кровельне залізо й ін.).

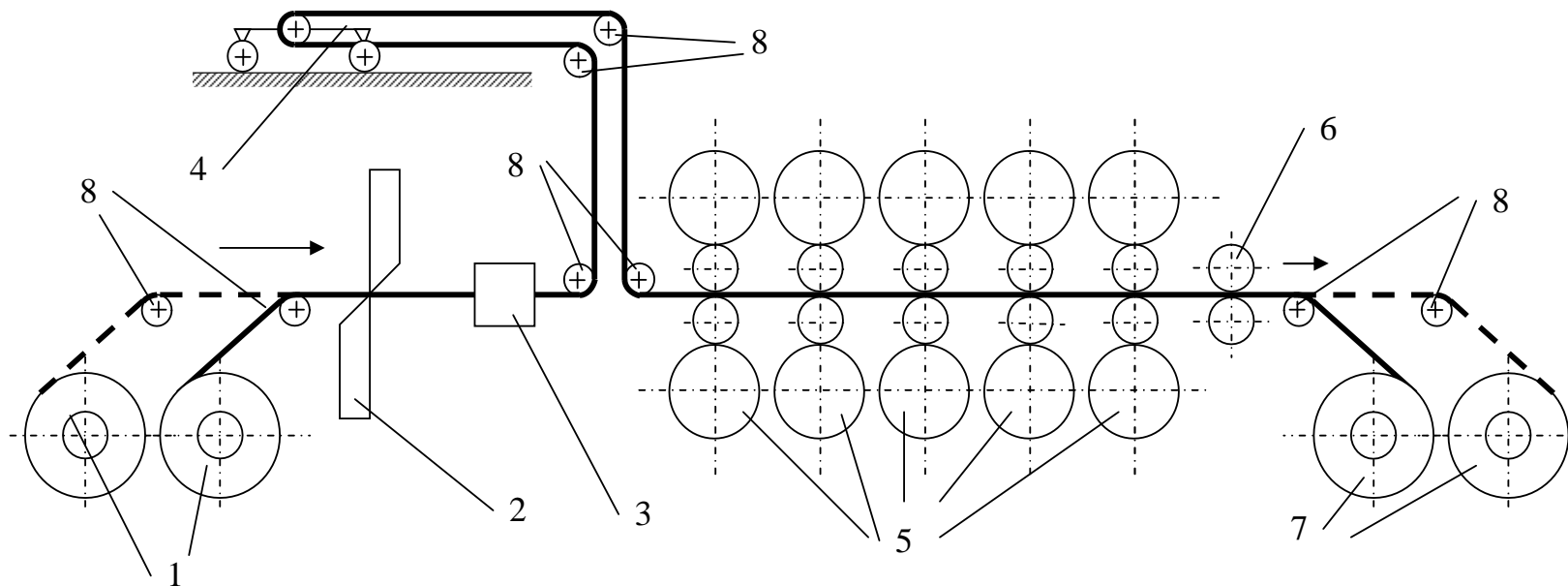


Рис.2.9. Схема непрерывного стана холодной прокатки

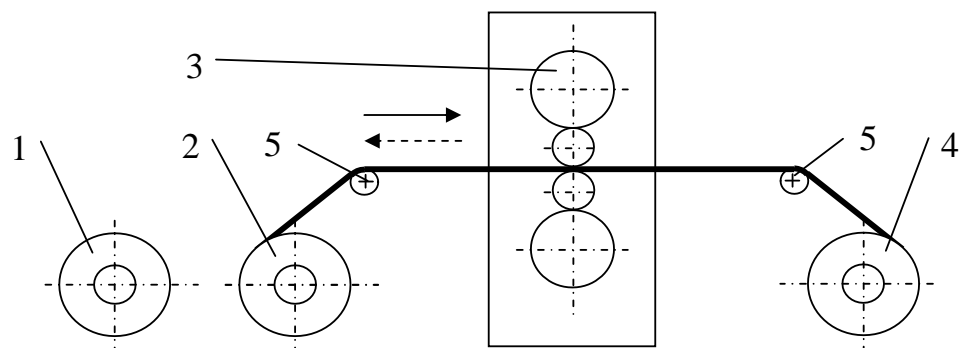


Рис.2.10. Схема реверсивного стана холодной прокатки

Неперервні стани є високопродуктивними станами зі швидкістю прокатки, яка досягає 40 м/с. Загальна потужність двигунів п'ятиклітьового неперервного стана 2000 складає 96 МВт, потужність одного двигуна досягає 12...13 тисяч кВт, що не є межею.

Крім робочих клітей 5 стан має два розмотувача 1, летючі ножиці 2, зварювальну машину 3 й пересувний петлеутримувач 4 (рис.2.8). На вихідній стороні встановлені летючі ножиці 6, натяжні ролики 8 й дві моталки 7. Петлеутримувач утворює запас смуги, що дозволяє в процесі прокатки виконувати різку кінців смуг й їх зварювання.

Очистка смуги від окалини й іржі виконується травленням у кислотних ваннах. Після травлення рулон подається на приймальний транспортер неперервного стана холодної прокатки, з якого надходить на розмотувач стана. В режимі поштовху рулон, закріплений у розмотувачі, повертається у напрямку стана й смуга за швидкості заправки 1...1,5 м/с подається послідовно у першу, другу й наступні кліті. Після виходу з останньої кліті передній кінець смуги заправляється на барабані моталки. Коли моталка з заправленим переднім кінцем смуги зробить декілька обертів, подається сигнал на підвищення швидкості обертання валків клітей й моталки з заправної до робочої. За звичай час розгону складає 10...15 с, а час прокатки усього рулону – декілька хвилин. В процесі роботи для отримання високої якості смуги необхідно величину натягу підтримувати постійною у всіх режимах – розгін, сталий режим, гальмування.

Перед закінченням прокатки робоча швидкість знижується до заправної. При заправній швидкості через кліті пропускається задній кінець смуги. Після цього змотаний в рулон лист знімається з моталки й відправляється для подальшої обробки.

В процесі прокатки можна 3...6 разів обтискувати метал без спеціальної обробки, що відповідає одному проходу на неперервному стані або 3...6 проходів на реверсивному. Це пояснюється тим, що в процесі холодної прокатки створюється наклеп металу, який підвищує його твердість й хрупкість. Подальша обробка металу стиском без спеціальної термічної обробки є недоцільною і навіть шкідливою.

Пластичні якості металу відновлюються шляхом термічної обробки (випалу) при температурі 600...700° у спеціальних печах. Після термічної обробки метал очищується травленням або піском чи дробом. Очищений метал знову можна прокатувати до потрібної товщини.

Реверсивні стани холодної прокатки відрізняються великою різноманітністю у відношенні конструкції, потужності й т. і. через широкий сортамент сталі, що прокатується. Вони виробляються одоклітьовими. Прокатка смуги виконується у декілька пропусків при реверсуванні робочих валків кліті (рис.2.10). Швидкість прокатки на реверсивних станах кватро досягає 10...20 м/с. Заправна швидкість і швидкість в режимі стрибка складає 0,5...1 м/с. Діапазон потужностей достатньо широкий – від 1 кВт (стан 60) до 4500 (стан 1200).

Реверсивні стани знайшли широке розповсюдження для прокатки тонких й зверхтонких смуг від 0,2 мм до 1...2 мкм з високою ступеню точності і товщиною. Для прокатки таких тонких смуг необхідно суттєво зменшувати діаметр робочих валків. При прокатці існує природна пружна деформація валків, абсолютне значення якої може бути порівняне з товщиною металевої смуги. Чим менше діаметр валків – тим менше їх абсолютна деформація при однаковому зусиллі на валки. Крім того, при зменшенні діаметра валка збільшується точність його виготовлення. Тому у реверсивних станах холодної прокатки тонких й зверхтонких смуг встановлюються робочі валки малого діаметру при великій їх довжині.

Валки малого діаметру й великої довжини мають малу жорсткість по довжині. Великі радіальні зусилля прокатки можуть призвести до вигинання валків. Тому для таких валків додатково використовують опорні валки. У цьому випадку реверсивний стан холодної прокатки називається багатовалковим. Виконують стани з 6-, 12-, 20-валковими клітьми.

При малому діаметрі прокатних валків ускладнено виконати їх приводними. Тому у клітьх з діаметром робочих валків 350...400 мм приводними є опорні валки. На рис. 2.11 представлена схема 20-ти валкового стану з приводом через опорні валки.

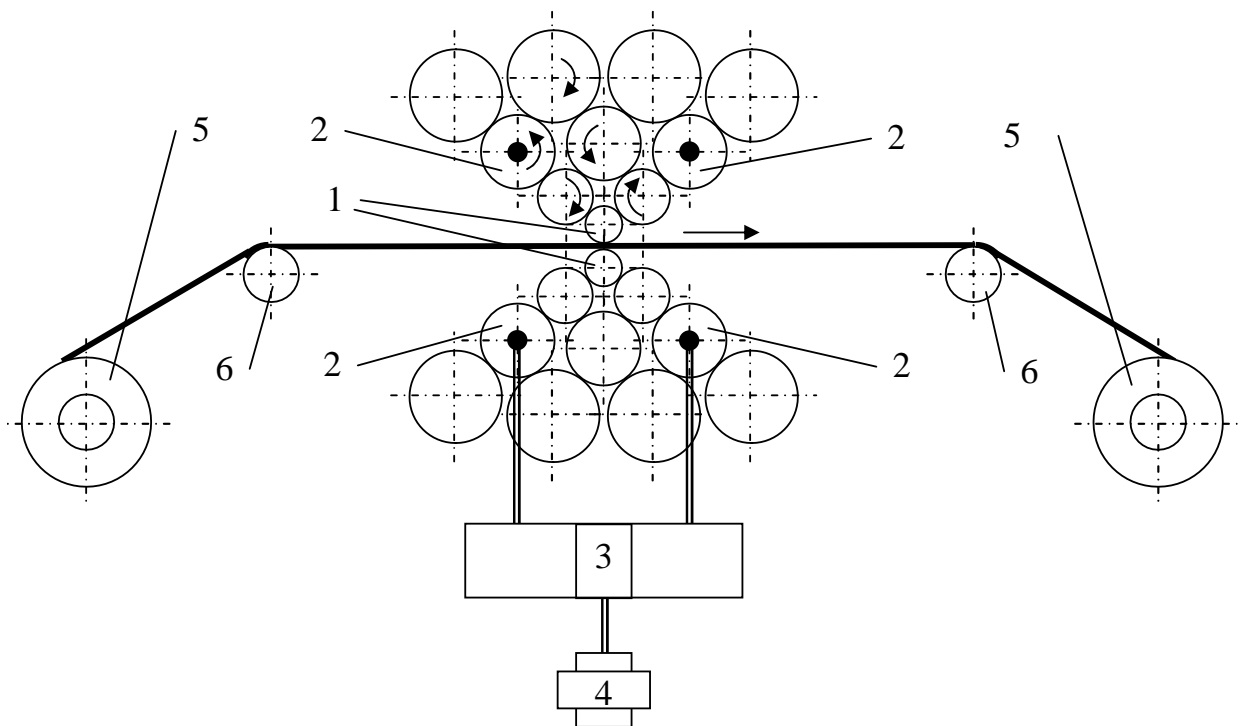


Рис. 2.11. Схема багатовалкового реверсивного стану холодної прокатки:
 1 – робочі валки; 2 – приводні опорні валки; 3 – редуктор; 4 – двигун;
 5 – моталка; 6 – натяжні ролики

Рулон, призначений для прокатки в реверсивному стані, встановлюється на розмотувачі стану 1 (рис.2.10). Передній кінець рулону пропускається на заправній швидкості через натяжні ролики 5, кліть 3 й закріплю-

ється на барабані вихідної моталки 4. Після цього встановлюється задане положення верхнього валка для завдання невеликого обтиску й стан розганяється до повної робочої швидкості. В кінці перемотування стан зупиняється і кінець смуги закріплюється на вхідній моталці 2. Далі створюється натяг спокою, який у подальшому прагнуть підтримувати незмінним як при розгоні й уповільненні, так і при сталій швидкості прокатки.

Перед кінцем прокатки у другому пропуску швидкість знижується й стан зупиняється. Далі змінюється положення верхнього робочого валка для отримання заданого обтиску у третьому пропуску, контролюється натяг й величина обтиску. Після цього виконується пуск стана у протилежному напрямку і так далі. Після закінчення прокатки верхній валок піднімається для пропуску через валки заднього кінця смуги, що був закріплений у моталці і не прокатався. Після цього задній кінець смуги проходить через валки без прокатки.

При збільшенні швидкості прокатки і збереженні незмінним розкриття валків товщина металу не залишається незмінною, а зменшується. Цей ефект називається “ефектом швидкості”. Він характерний також і для неперервних станів холодної прокатки. У деяких випадках зменшення товщини смуги при переході від заправної швидкості до повної може досягати 20...40%. У зв'язку з цим необхідно, щоб довжина частини смуги, яка прокатується у процесі пуску та гальмування, була мінімальною. Таким чином, час перехідних процесів розгону й гальмування повинен бути мінімальним.

Дресировочні стани. Лист після холодної прокатки у неперервних й реверсивних станах піддається випалу у пічах. Випалений лист надходить на дресировочний стан, на якому виконується холодна прокатка з малим обтиском порядку 0,5...2%.

Дресировочні стани призначені для отримання поверхневої міцності металу на глибині не більше декількох десятків мікрон, що необхідно при штампуванні листа. При дресировуванні листів з легированих сталей механічні якості листів не покращуються, але усуваються їх нерівності.

Існують одно- і двохклітьові дресировочні стани. Одноклітьовий стан кватро 1700 виконує дресировку смуг товщиною 0,4...2 мм і шириною 700...1550 мм зі швидкістю 25 м/с. Двохклітьовий стан кватро 1200 призначений для дресировки смуг товщиною 0,18...0,6 мм й шириною 500...1050 мм зі швидкістю 25 м/с.

Вимоги до електропривода. Головні електроприводи клітей неперервних станів холодної прокатки й дресировочних станів:

- 1) плавний пуск й гальмування за мінімальний час;
- 2) плавне регулювання швидкості від заправної 0,5...1 м/с до максимальної робочої 30 м/с у діапазоні 50:1...100:1;
- 3) підтримання співвідношення швидкостей неперервного стана з точністю 0,5%;
- 4) рекуперативне гальмування за допомогою реверсивної групи вентилів (50% потужності);

- 5) узгодження швидкостей прокатки між клітьми й намотувальними пристроями з точністю до 1%;
- 6) забезпечення необхідних величин натягу смуги у всіх режимах роботи стана з точністю 3...5%;
- 7) можливість спільного й роздільного керування двигунами клітей і моталок;
- 8) можливість зміни швидкостей двигунів кожної кліті при збереженні незмінним заданих темпів прискорення й уповільнення;
- 9) створення натягу спокою;
- 10) можливість поштовхової роботи;
- 11) можливість зміни ступені жорсткості механічних характеристик двигунів головного привода;
- 12) автоматичне уповільнення стана при підході зварних швів при закінченні прокатки;
- 13) аварійне гальмування при обриві смуги.

Головні електроприводи клітей реверсивних станів холодної прокатки:

- 1) реверсування робочих валків клітей;
- 2) плавний пуск і гальмування;
- 3) плавне регулювання швидкості від заправної 0,5...1 м/с до максимальної робочої 20 м/с у діапазоні 30:1...50:1;
- 4) точність підтримання частоти обертання у сталому режимі біля 1%;
- 5) узгодження роботи двигунів кліті з двигунами моталок;
- 6) аварійна зупинка привода кліті з переводом двигуна на динамічне гальмування.

2.5. Допоміжні механізми прокатних станів

Сучасний прокатний стан є складним комплексом різних механізмів, які пов'язані між собою технологічним процесом. Основну операцію прокатки на прокатному стані забезпечують допоміжні операції подачі металу до валків, установка робочих валків, кантування металу, змотування та розмотування, транспортування, різка, правка та ін. Усі ці операції виконуються допоміжними механізмами стана.

Класифікація механізмів прокатних станів. Механізми прокатних станів можна розділити за наступними ознаками.

1. За призначенням: а) транспортні: злитковози, рольганги, маніпулятори, кантувачі, поворотні й підйомно-качаючі столи, шлеппери, штовхачі і т.і.; б) механізми встановлення: натискні пристрої для установки верхніх валків, пристрої для перевалки валків, переміщення клітей і т.і.; в) механізми різки металу: ножиці, пилки і т.і.; г) правильні механізми; д) механізми для змотування та розмотування металу: моталки, розмотувачі.

2. За режимом роботи: а) довготривалого режиму роботи: деякі рольганги, дискові ножиці, правильні машини і т.і.; б) короткочасного режиму роботи: натискні пристрої сортових й листових неперервних станів, механізми переміщення клітей й перевалки валків, деякі види штовхачів й упорів; в) повторно-короткочасного режиму роботи: приймальні й робочі рольганги, маніпулятори, кантувачі, натискні пристрої, ножиці і т.і.

3. За необхідністю регулювання швидкості: а) механізми, що не вимагають регулювання швидкості: приймальні, рольганги, що підводять і відводять, деякі транспортні рольганги, кантувачі, пилки, штовхачі, упори і т.і.; б) механізми, що вимагають регулювання швидкості: злитковози, робочі рольганги, деякі транспортні рольганги, натискні пристрої, маніпулятори, ножиці і т.і.

4. За необхідністю обмеження моменту: а) механізми, які не працюють на упор; б) механізми, які працюють на упор і вимагають обмеження моменту.

Моталки й розмотувачі. На вхідній і вихідній сторонах неперервних і реверсивних станів холодної прокатки розташовані намотувальні пристрої (рис. 2.9, 2.10). На неперервних станах намотувальні пристрої працюють без реверсу: на вхідній стороні – у режимі розмотування, на вихідній – у режимі намотування. На реверсивних станах намотувальні пристрої змінюють режим кожний раз з реверсом стана.

Намотування (розмотування) смуги повинно виконуватися з натягом смуги. Відсутність натягу вважається аварійним режимом через виникнення перекосу смуги й створення петлі.

Величина натягу впливає на якість металу. Прокатка повинна виконуватися з постійним значенням величини натягу, інакше з'являється повздожня різнотовщинність смуги. Для регулювання натягу смуги використовують системи прямого і непрямого регулювання. У системах прямого регулювання натягу виконується прямий, безпосередній замір зусиль натягу. Найбільш поширеними є системи непрямого заміру натягу. У таких системах замірюється не само величина натягу, а величина, яка непрямо пов'язана з натягом.

У процесі намотування (розмотування) відбувається постійна зміна діаметру рулону. Зміна діаметру рулону при незмінній кутовій швидкості намотувальних пристроїв призводить до відповідної зміни зусиль натягу смуги. Наприклад, при намотуванні смуги на барабан моталки діаметр рулону D_p збільшується (рис. 2.12). При незмінній кутовій швидкості барабану його лінійна швидкість ϑ прагне до збільшення по відношенню до лінійної швидкості прокатки ϑ_{np} у валках останньої кліті. Виникає різниця швидкостей, яка викликає збільшення натягу. Якщо у цьому випадку швидкість обертання двигуна моталки залишити незмінною, то збільшення лінійної швидкості рулону швидко призведе до критичного зростання зусиль натягу та обриву смуги.

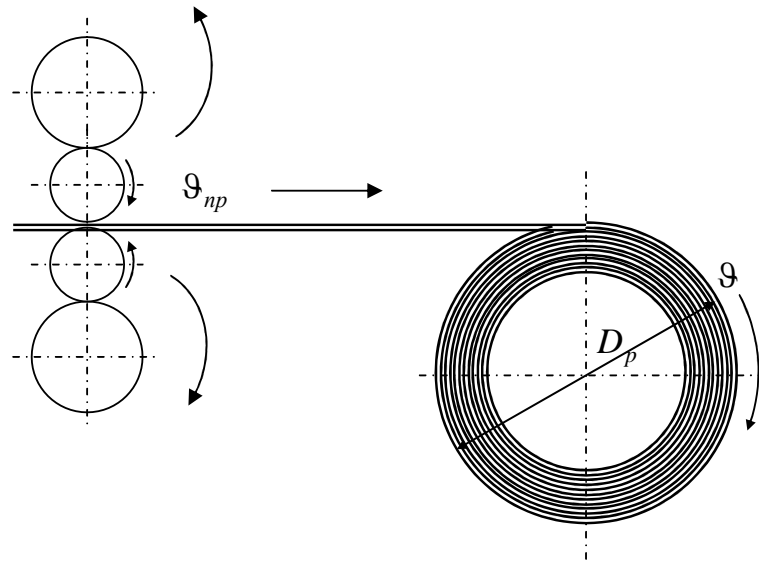


Рис.2.12. Схема намотування смуги на барабан моталки

Тому необхідне зменшення кутової швидкості моталки ω_p таким чином, щоб швидкість намотування смуги дорівнювала швидкості виходу металу з валків останньої кліті ϑ_{np} . Таким чином, система керування електроприводом моталки повинна забезпечити сталість сили натягу T на ділянці моталка (розмотувач) – прокатна кліть (тягнучі ролики) й незмінність вихідної (вхідної) лінійної швидкості металу $\vartheta = \vartheta_{np}$. Ці вимоги практично реалізуються у системі регулюванні й підтримання незмінності електромагнітної потужності двигуна моталки

$$P_{em} = \frac{T\vartheta}{\eta}, \quad (2.15)$$

де η – ККД привода з урахуванням втрат у двигуні й редукторі.

Регулювання за принципом (2.15) є прикладом непрямого регулювання натягу.

Вимоги до електропривода моталок і розмотувачів. Системи керування приводів намотувально-розмотувальних й натягувальних механізмів повинні забезпечувати два режими роботи: регулювання частоти обертання двигуна й регулювання натягу смуги. Перший режим є допоміжним й не має жорстких вимог до якості регулювання. Цей режим слугує для заправки смуги, її транспортування без натягу, обмеження частоти обертання двигуна при обриві смуги. У режимі регулювання частоти необхідно забезпечити:

- 1) поштовховий режим у обидві сторони із заданим темпом змінювання й рівнем швидкості;
- 2) точність підтримання швидкості біля 2%;

3) час зростання швидкості під час поштовху без виходу на струмообмеження 0,1...0,2 с.

У режимі регулювання натягу:

- 1) синхронізація по швидкості привода намотувально-розмотувальних механізмів й привода валків кліті стана;
- 2) діапазон регулювання швидкості у режимі підтримання натягу не більше 1:50 (визначається добутком кратності швидкості прокатки 10...20 на кратність зміни діаметру рулону 1,5...4,0);
- 3) діапазон регулювання натягу для різних станів 1:5...1:20, у деяких випадках 1:50;
- 4) точність підтримання незмінності натягу у сталому режимі 3...12%;
- 5) точність підтримання незмінності натягу у динамічному режимі 3...8%;
- 6) час відпрацювання східчастого завдання натягу не більше 0,2 с з перерегулюванням не більше 10%;
- 7) регульоване перевищення лінійної швидкості барабана над швидкістю смуги при заправці у межах 0...30%;
- 8) обмеження перевищення швидкості барабану при обриві смуги на максимальній швидкості 5%, на заправній швидкості – 15%, з подальшою зупинкою привода.

Натяжні ролики. Натяжні ролики повинні забезпечувати незмінність натягу смуги на ланці "кліть – натяжний ролик" або між сусідніми натяжними роликами. Група цих механізмів працює у тривалому і за звичай нереверсивному режимі. Через можливість зміни режиму натягу, коли окремі електроприводи можуть переходити з режиму двигуна у інверторний режим і навпаки, виникає необхідність у реверсивному електроприводі. Крім цього існують додаткові вимоги до електропривода:

- 1) точність підтримання натягу 3...5%;
- 2) час відпрацювання поштовху завдання струму не більше 10...25 мс.

Натискні пристрої. За умовами технологічного процесу у багатьох прокатних станах виникає необхідність у зміні положення верхнього робочого валка кліті відносно нижнього. Таким чином змінюється розкривання валків. У одних станах розкривання валків виконується часто, після кожного пропуску (обтискні стани гарячої прокатки, реверсивні стани холодної прокатки), у інших – рідко, при переході від одного профілю металу, що прокатується, до іншого, зносі калібрів, підшипників. У більшості випадків переміщується верхній робочий валок.

Механізм, за допомогою якого змінюється положення робочого валка, називається *натискним пристроєм* (рис.2.13). В залежності від швидкості переміщення валка й типу привода натискні пристрої діляться на такі групи:

- 1) механізми з ручним приводом (старі конструкції невеликих станів гарячої й холодної прокатки, сортові стани з незмінним калібром валків);

2) тихохідні механізми з електроприводом для станів з невеликою висотою підйому верхнього робочого валка, що вище 1500 мм (блूमінги, слябінги, універсальні стани, товсто- й середньолистові стани); швидкість переміщення верхнього валка більше 0,2...1,0 мм/с;

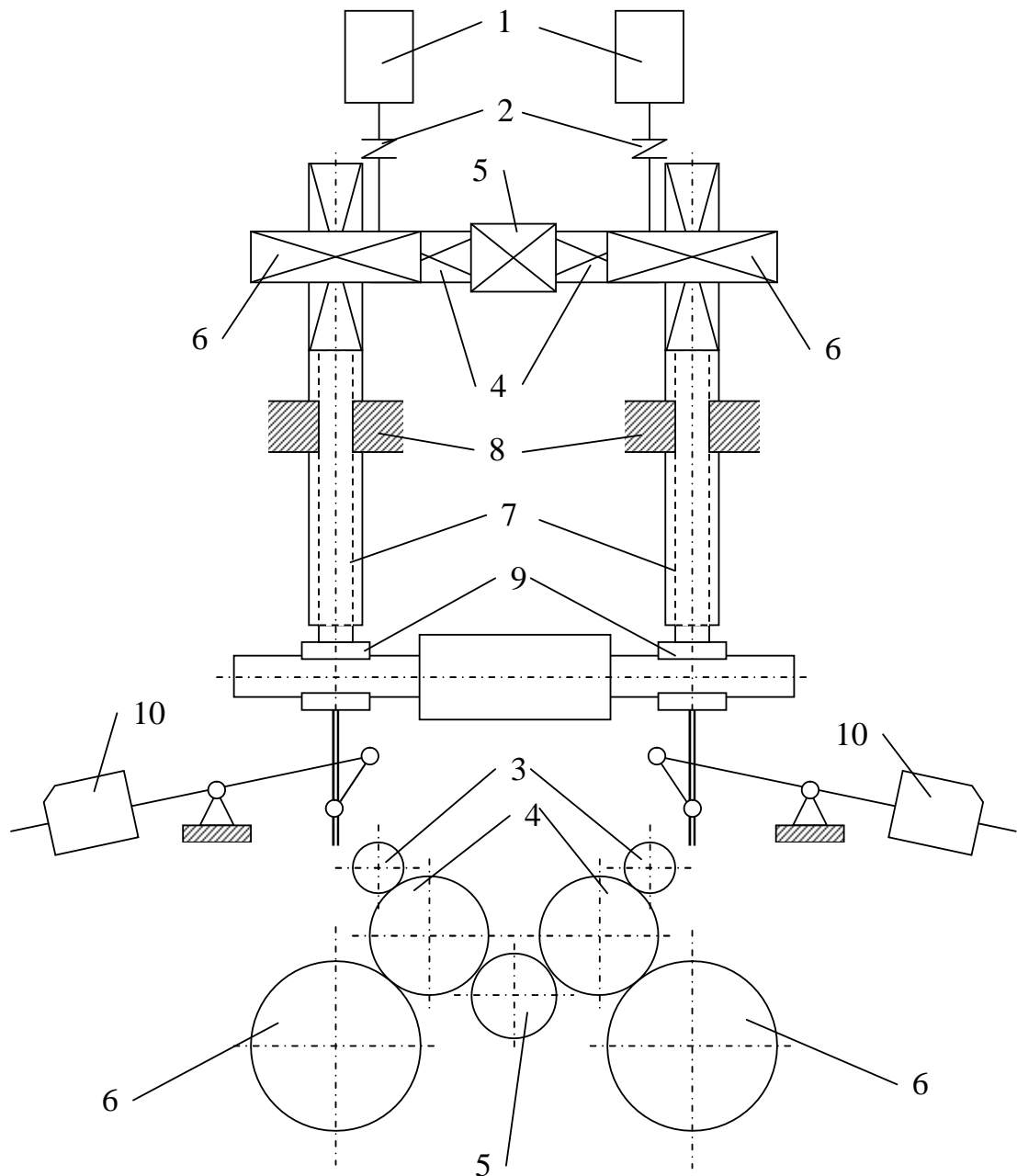


Рис. 2.13. Кінематична схема натискного пристрою з навантажувальною рівновагою:

1 – двигун; 2 – муфта; 3 – шестерня двигуна; 4 – проміжна шестерня; 5 – роз’єднувальна шестерня; 6 – редуктор; 7 – натискний гвинт; 8 – гайка натискного гвинта; 9 – подушка валків; 10 – рівновага.

3) швидкохідні механізми з електроприводом для станів з відносно великою висотою підйому верхнього робочого валка, що вище 1500 мм (блюмінги, слябінги, універсальні стани, товсто- й середньолистові стани); швидкість переміщення верхнього валка змінюється у широких межах (табл.2.1).

Таблиця 2.1

Швидкість переміщення верхнього валка натискних пристроїв

Назва стана	Швидкість, мм/с
Блюмінг	40...200
Товстолистовий, середньолистовий	12...25
Сортовий	2...5
Тонколистовий гарячої і холодної прокатки	2,5...4

Електроприводи натискних гвинтів мають у своєму складі контур регулювання положення для установки гвинтів у задане положення, а також для синхронізації переміщення лівого і правого гвинтів при електричному способі синхронізації. Вимоги до відпрацювання положення залежать від типу стана. Наприклад, для натискних гвинтів чистової кліті товстолистового стана помилка відпрацювання положення складає $\pm 0,01$ мм при ході 50-80 мм. Час відпрацювання положення без виходу на струмообмеження не повинно перевищувати 0,2...0,3 с.

Значна кількість натискних пристроїв станів працюють у повторно-короткочасному режимі з великою кількістю включень за годину (обтискні, товстолистові, середньолистові стани). У блюмінгів число переміщень верхнього валка досягає 1600...2000 переміщень на годину.

У неперервних листових станів гарячої прокатки, сортових, заготівельних й дротових станів натискний пристрій працює у короткочасному режимі. Верхній робочий валок переміщується тільки при настроюванні стана.

У неперервних й реверсивних станів холодного прокатування з автоматичним регулюванням товщини смуги частота включення натискних пристроїв досягає 1800 на годину. Без автоматичного регулювання товщини смуги частота включень дуже мала.

Ножиці. Ножиці призначені для поперечного та подовжного різку у гарячому та холодному стані прокатного металу. Розділяють наступні види різку металу: а) на мірні довжини; б) обрізка переднього і заднього кінців; в) подовжний розріз широких листів на смуги; г) обрізка кромки у листів.

За конструктивним виконанням ножей розділяють такі типи ножиць: а) з паралельними ножами; б) з нахиленими ножами; в) летючі ножиці; г) дискові ножиці.

Ножиці з паралельними ножами використовують для різки металу квадратного й прямокутного перетину і висотою більше ніж 30...60 мм на куски мірної довжини, а також для обрізки переднього й заднього кінців металу після прокатки на блюмінгах, слябінгах, заготівельних й сортових станах. Такі ножиці можуть бути двох типів: з верхнім різом (при різі ру-

хається верхній ніж, а нижній нерухомий); з нижнім різом (при різі рухається нижній ніж, а верхній нерухомий).

Ножиці з верхнім різом за звичай мають кривошипно-шатунний передавальний механізм й відносно прості за конструкцією (рис. 2.14).

Ножиці з верхнім різом мають суттєві недоліки, По-перше, після різі металу на нижній границі металу створюються задирки, що стримують рух металу по рольгангу. По-друге, така конструкція ножиць передбачає наявність підйомно-качаючих столів (рис.2.14, позиція 3).

Ножиці з нижнім різом не мають таких недоліків, але вони складніші за конструкцією. Найбільш досконалі ножиці із ексцентриковим валом, що плаває.

В залежності від товщини металу, що розрізається, різання може виконуватися при роботі ножиць за круговим циклом, коли ексцентриковий вал виконує повний оберт, або за циклом качання, коли за цикл роботи ножиць ексцентриковий вал виконує менше одного оберту. За циклом качання напрям обертання електродвигунів ножиць змінюється.

Ножиці з нахиленими ножами мають нижній ніж, встановлений горизонтально, а верхній – нахилений. Такі ножиці призначені для різання гарячих і холодних листів, сортового металу пачками. Цей тип ножиць може бути з верхнім або нижнім рухомим ножем.

В дискових ножицях обидва ножі представляють собою круглі диски (рис. 2.15). При розрізі металу диски обертаються у різні сторони.

Дискові ножиці використовуються при розрізі металу значної довжини, коли він рухається, наприклад, при обрізі кромки листів, подовжному розрізі широких листів на смуги. В залежності від того, на яку кількість смуг необхідно розрізати метал, ці ножиці можуть мати дві або більше пар дискових ножей.

Різання металу на дискових ножицях виконується на ходу. Швидкість дискових ножей встановлюється в залежності від товщини металу, що розрізається і може змінюватися у широких межах.

Летючі ножиці виконують поперечний розріз металу на ходу. Найбільш часто зустрічаються барабанні та кривошипні ножиці.

Барабанні летючі ножиці призначені для поперечного різі тонкого листового й дрібного сортового прокату на ходу зі швидкістю до 25 м/с. (рис. 2.16). Недоліком такої конструкції ножиць є непаралельність ножей при різі, що впливає на якість поверхні металу в місті різі. У зв'язку із цим, при розрізі товстих ножів використовують кривошипні летючі ножиці із паралельним ходом ножей.

Електропривод і вимоги до електропривода ножиць. У ножицях з паралельними і нахиленими ножами, що мають кривошипні механізми, використовується неперервно працюючий привод із запуском і зупинкою ножиць за допомогою муфти, або привод, що включається одночасно із ножицями.

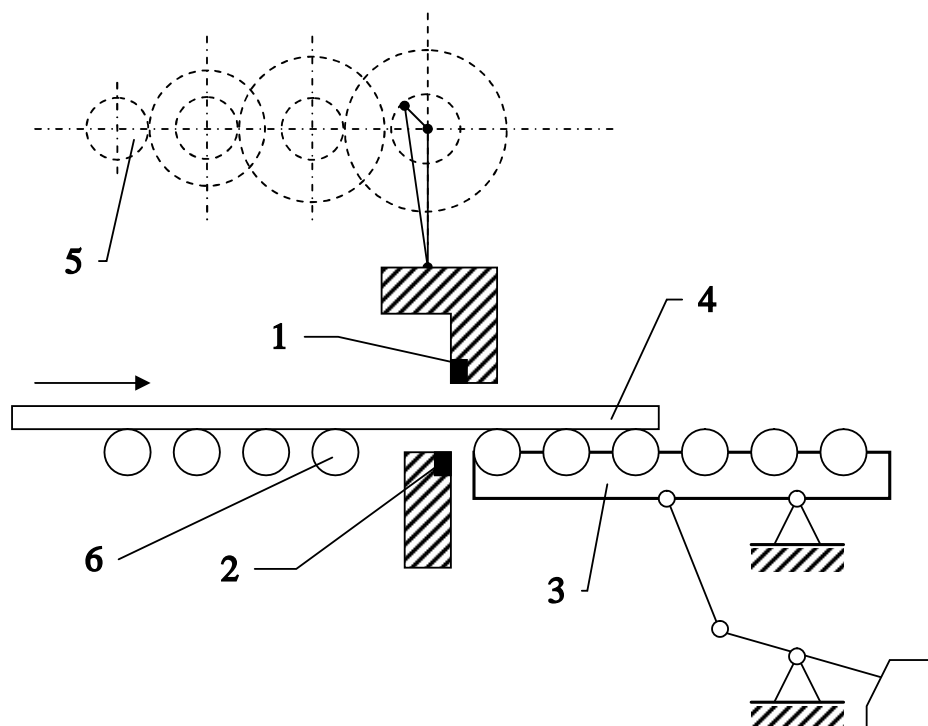


Рис. 2.14. Ножиці з верхнім різом:
 1 – верхній ніж; 2 – нижній ніж; 3 – підйомний стіл; 4 – метал, що розрізається; 5 – шестерня на валу двигуна; 6 – рольганг

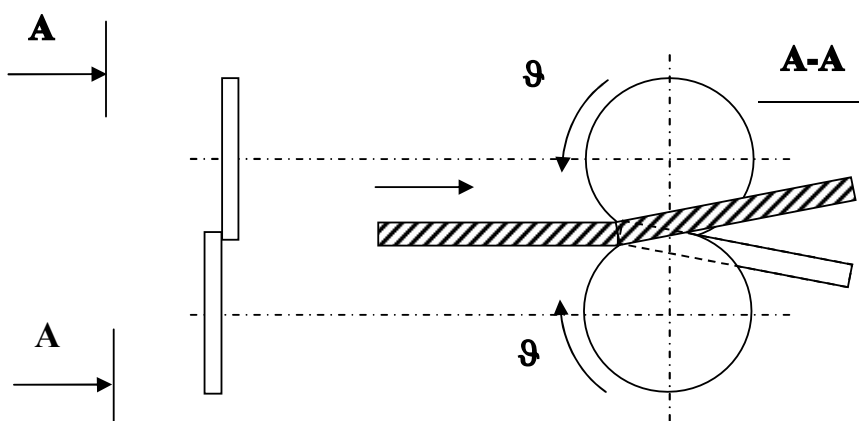


Рис. 2.15. Діскові ножиці

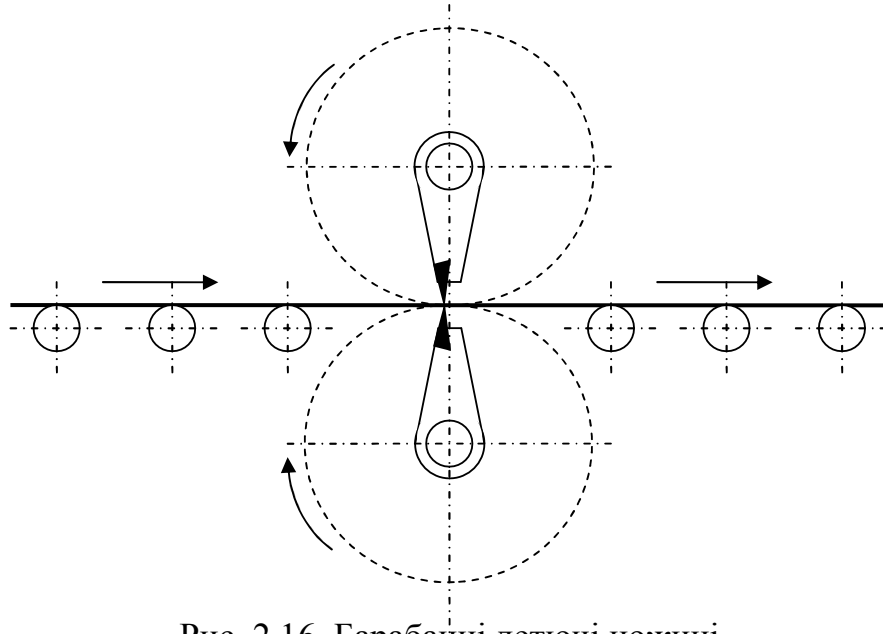


Рис. 2.16. Барабанні летючі ножиці

У першому випадку привод працює у довготривалому режимі із змінним навантаженням. Рекомендований варіант привода – асинхронний нерегульований. У другому випадку двигун включається кожний раз перед порізкою, тому режим роботи електропривода – повторно-короткочасний, з великою кількістю включень на годину. Використовується електропривод постійного струму.

Дискові ножиці працюють у довготривалому режимі з регулюванням або без регулювання швидкості. При регулюванні швидкості використовують електропривод постійного струму, інакше – асинхронний нерегульований привод.

Летючі ножиці розділяють: а) на працюючі практично із незмінною частотою обертання ножів між різаними з регулятором просторового положення ножів або без нього; б) працюючі за заданою програмою частоти обертання двигуна між різаними; в) працюючі у режимі запуску на кожний різ.

Загальною вимогою для електропривода летючих ножиць, що працюють в усіх згаданих режимах, є синхронізація частоти обертання двигуна із швидкістю переміщення смуги та деяке її перевищення для отримання якісного різ.

При розрізанні листового або сортового металу на мірну довжину летючі ножиці працюють у режимі (а) або (б). Привод повинний бути реверсивний, з регулюванням частоти обертання двигуна. Завдання на швидкість подається з датчика швидкості електропривода останньої кліти стана або роликів, що подають. Довжина частини металу, що розрізається, змінюється шляхом впливу на співвідношення частот обертання двигунів кліти й ножиць. Максимальна похибка не повинна перевищувати 0,5% дов-

жини металу, що розрізається. Для отримання першої мірної довжини повинен існувати контур положення, який потім відключається.

Для відрізання некондиційного переднього і заднього кінців заготовок перед чистовими групами неперервних дрібносортових і листових станів використовують летючі ножиці у режимі (в). При цьому, у момент різі швидкість ножів повинна бути декілька вище за швидкість металу. Після різі привод повинен вернути ножі у початкове положення для наступного різі. Досягнення повної швидкості і повне гальмування повинно виконуватися за один оберт ножів, тому привод повинен забезпечувати максимальні прискорення. Привод повинний бути реверсивним. Для зупинки ножиць у строго фіксованому положенні необхідно використовувати систему регулювання положення або шляховий вимикач з переводом перед зупинкою на повзучу швидкість. Точність зупинки у початковому положенні 1...2°. Використання летючих ножиць в такому режимі роботи для різання мірних довжин потребує розрахунку моменту включення за допомогою розрахункового пристрою.

Рольганги. Для транспортування металу, що прокатується, за допомогою обертаючих роликів використовують рольганги. За призначенням рольганги розрізняють на наступні групи.

1. *Робочі основні рольганги* розташовані безпосередньо біля кліті стана. Перші ролики робочих рольгангів розташовуються, зазвичай, в станині кліті. Це так звані *станинні ролики*. Вони забезпечуються індивідуальним приводом і призначені для покращання умов захвату металу валками.

2. *Робочі допоміжні рольганги*. Інакше вони називаються *подовженими* або *розкатними*. Ці рольганги є продовженням основних робочих рольгангів і включаються у роботу, коли довжина металу, що прокатується, перевищує довжину основних робочих рольгангів.

3. *Транспортні рольганги* призначені для передачі металу від одного механізму стана до другого або від стана до стана. Один і той же рольганг в залежності від напрямку потоку металу відносно певного механізму може бути *тим, що підводить*, або *тим, що відводить*. Рольганг, що розташований на початку стана і слугує для прийому металу, називається *приймальним*.

4. *Пакетировочні рольганги* мають косі ролики і використовуються для збирання смуг металу у пачки перед та за ножицями, передачі металу на холодильник.

5. *Пересувні рольганги* вбудовуються у столи, що переміщуються, рельсобалочних й трубозварювальних станів, підйомно-качаючих столів станів трію, паралельно-підйомних столів для завантажування металу у нагрівальні печі і т.і. та слугують для переміщення металу у двох напрямках – по роликах рольгангу, а також у напрямку переміщення самого рольгангу, вбудованого у певний механізм.

Основні параметри рольганга: діаметр й довжина бочки ролика, відстань між всіяма двох сусідніх роликів (крок рольганга), кількість роликів. Діаметр роликів вибирається мінімальним за умовами міцності. Напри-

клад, у робочих рольгангів блюмінгів і слябінгів діаметр роликів 600...400 мм., у рольгангів листових і сортових – 350...200 мм. Довжина бочки роликів робочих рольгангів береться рівною або декілька більшою від довжини бочки валків стана. Крок роликів вибирається з таким розрахунком, щоб метал одночасно лежав не менш ніж на двох роликах і був відсутній прогин металу від своєї ваги. Наприклад, у рольгангів обтискних станів крок має значення 0,7...1 м, у крупно сортних станів 1,2...1,6 м, у середньосортних – 0,9...1,0 м, у тонколистових – 0,5...0,7 м. Кількість роликів залежить від довжини металу, що транспортується і досягає, у деяких випадках, декілька десятків.

Лінійна швидкість робочих роликів та рольгангів, що відводять, приблизно на 5...10% вище швидкості прокатки. Для рольгангів що підводять, швидкість складає 1,5...2,5 м/с, у транспортних вона вибирається в залежності від заданої продуктивності і змінюється в межах 1,5...12 м/с.

Електропривод рольгангів. Режим роботи рольгангів визначається їх призначенням й типом стана. Значна кількість рольгангів працює у повторно-короткочасному режимі. В табл.2.2. наведені для прикладу дані про режим роботи деяких рольгангів.

Таблиця 2.2

Режими роботи рольгангів

Назва рольгангу	Тривалість включення, %	Число включень на годину
Приймальний рольганг блюмінга	4...8	90
Робочі рольганги блюмінга	60	1000...1200
Робочі рольганги товстолистого стана	40	800
Робочі рольганги рейко-балочного стана	75...100	350...450
Розкатні рольганги перед кліттю рейко-балочного стана	60...80	30...110
Розкатні рольганги після кліті рейко-балочного стана	50...80	175...450
Транспортний рольганг пилок гарячої різки рейко-балочного стана	80...90	200

Тип електропривода рольганга вибирається виходячи з режиму його роботи, необхідності регулювання швидкості, точності зупинки та інших умов. При необхідності регулювання швидкості слід визначитися також із діапазоном регулювання швидкості і плавністю регулювання.

Рольганги виконуються із груповим, індивідуальним приводом, а також з неробочими роликами.

Груповий привод (рис.2.17) використовується у рольгангів, які переміщують короткі заготовки, коли на один ролик випадає майже вся вага заготовки (початкова довжина металу близька до кроку рольгангу). Це, наприклад, робочі, подовжені та приймальні рольганги обтискних станів.

При груповому приводі секція рольгангу в 3...10 роликів й більше, має загальний привод від одного або двох двигунів. Такий тип привода дозволяє зменшити встановлену потужність двигунів відносно індивідуального привода і, відповідно, зменшується його вартість.

Для рольгангів з груповим приводом, що має частоту включень не більше 500 і не вимагає регулювання швидкості, використовуються асинхронні двигуни з фазним ротором.

При необхідності регулювання швидкості валків використовується електропривод постійного струму з тиристорним регулюванням напруги.

Індивідуальний привод (рис. 2.18) використовується для станинних роликів та у транспортних рольгангів, які переміщують метал значної довжини. При такій довжині маса металу розподіляється на велику кількість роликів. При індивідуальному електроприводі рольгангів кожний ролик приводиться у рух окремим двигуном.

Для індивідуального електропривода роликів транспортних рольгангів використовуються асинхронні короткозамкнені двигуни спеціальної конструкції із значною перевантажувальною здатністю. Живлення цих двигунів виконується від перетворювача частоти, загального для усіх електродвигунів декількох секцій рольганга. Діапазон регулювання 10...60 Гц. Використовують також електропривод постійного струму з груповим тиристорним регулюванням напруги.

В залежності від швидкості рольгангів використовують редукторний і безредукторний електропривод. Вибір того чи іншого варіанту необхідно здійснювати після відповідного техніко-економічного обґрунтування.

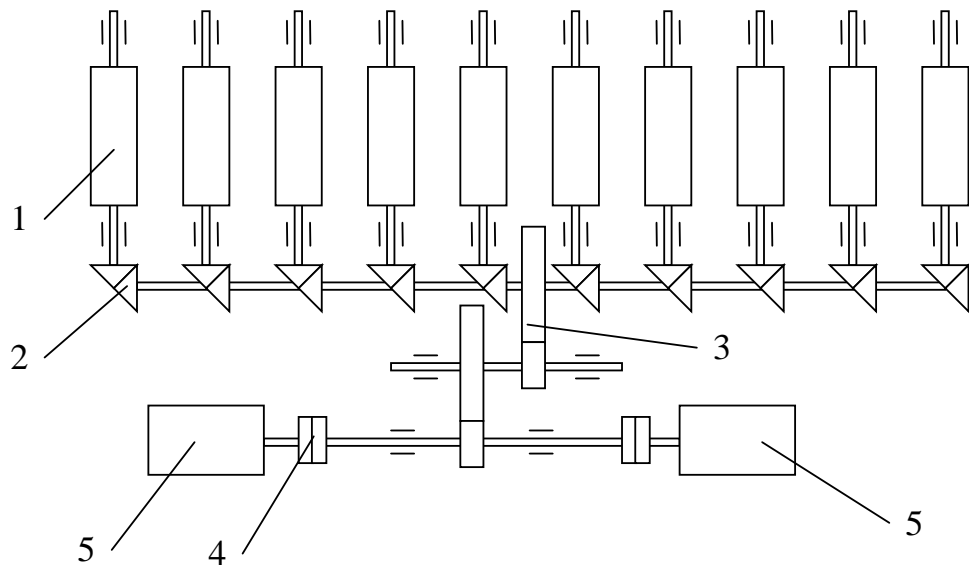


Рис.2.17. Груповий електропривод рольганга:
 1 – ролик; 2 – конусна зубчата передача, 3 – редуктор, 4 – муфта, 5 – двигун

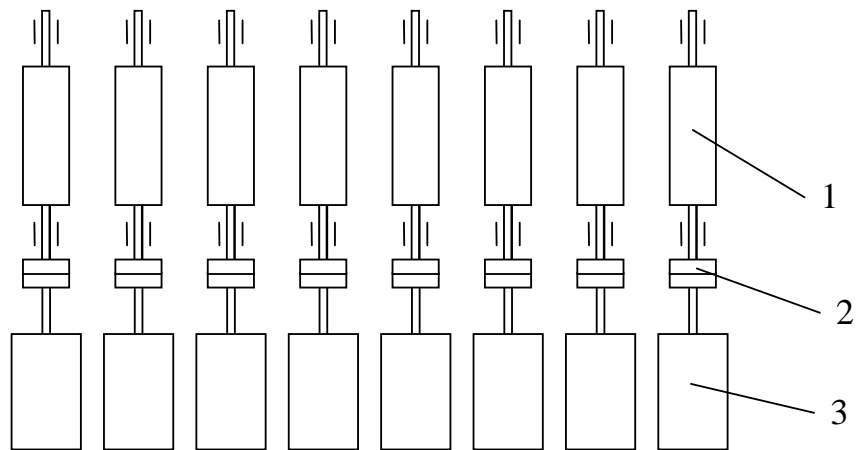


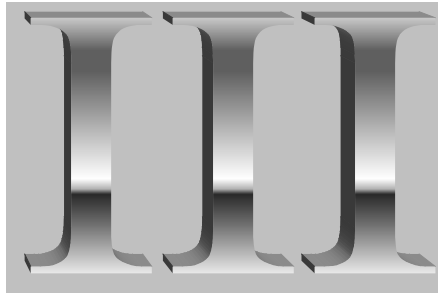
Рис.2.18. Індивідуальний електропривод рольганга:
 1 – ролик; 2 – муфта, 3 – двигун

Контрольні запитання

1. Що таке реверсивні стани? Їх призначення та приклади.
2. Що таке блюмінг і слябінг? Їх відмінності, характерні особливості. Які бувають блюмінги?
3. Приблизний план розташування технологічного обладнання блюмінга і його опис.
4. Описати технологічний процес прокатки заготовки у блюмінгу.
5. Характеристика роботи і вимоги до електропривода реверсивних обтискних й заготівельних станів гарячої прокатки, чорнових клітей універсальних, рейкобалкових, крупносортових й листових реверсивних станів гарячої прокатки, реверсивних чистових клітей товстолистових станів гарячої прокатки.
6. Навести послідовність розрахунку потужності двигуна реверсивного стана гарячої прокатки.
7. Розрахувати циклограму (тахограму) прокатки.
8. Особливості неперервної прокатки. Режим вільної прокатки. Вивести аналітичну залежність співвідношення швидкостей сусідніх клітей при вільній прокатці.
9. Прокатка металу з натягом. Коефіцієнт натягу. Вивести аналітичну залежність співвідношення швидкостей сусідніх клітей при прокатці з натягом.
10. Прокатка металу з підпором. Коефіцієнт підпору. Вивести аналітичну залежність співвідношення швидкостей сусідніх клітей при прокатці з підпором.
11. Ударне прикладення навантаження в неперервних станах. Причини виникнення. Описати процес і наслідки.
12. Приблизний план розташування обладнання неперервного широкоугового стана гарячої прокатки, його опис і технологічний режим прокатки.
13. Устрій і технологічний режим роботи крупносортових станів.
14. Устрій і технологічний режим роботи дрібносортових станів.
15. Устрій і технологічний режим роботи дротових станів.
16. Устрій і технологічний режим роботи заготівельних станів.
17. Вимоги до електропривода головних електроприводів чорнових клітей неперервних сортових (середньосортових, дрібносортових) й листових станів гарячої прокатки; прошивних розкатних й піліг-

рімових станів трубопрокатних агрегатів й чистових нереверсивних клітей універсальних рейко-балочних станів.

18. Вимоги до головних електроприводів чистових клітей неперервних заготівельних, сортових, листових станів гарячої прокатки; неперервних калібровочних та редуційних станів трубопрокатних агрегатів.
19. Вимоги до головних електроприводів чистових клітей неперервних тонколистових станів гарячої прокатки.
20. Вимоги до головних електроприводів клітей чистової групи дровових станів.
21. Стани холодної прокатки: призначення, основні відомості про холодну прокатку, що включає в себе технологічний процес?
22. Неперервні стани холодної прокатки: основні відомості, устрій і технологічний режим роботи.
23. Реверсивні стани холодної прокатки: основні відомості, устрій і технологічний режим роботи.
24. Дресировочні стани: основні відомості.
25. Вимоги до головних електроприводів клітей неперервних станів холодної прокатки й дресировочних станів.
26. Вимоги до головних електроприводів клітей реверсивних станів холодної прокатки.
27. Класифікація допоміжних механізмів прокатних станів.
28. Моталки й розмотувачі. Принцип непрямого регулювання натягу.
29. Вимоги до електропривода моталок і розмотувачів.
30. Натяжні ролики: призначення, відмінності від моталок і розмотувачів, додаткові вимоги до електропривода.
31. Натискні пристрої: призначення, устрій, класифікація.
32. Принципи і режими роботи електропривода натискних гвинтів.
33. Ножиці: типи ножиць, призначення, устрій, переваги і недоліки конструкцій.
34. Електропривод і вимоги до електропривода ножиць.
35. Рольганги: класифікація за призначенням, основні параметри рольганга.
36. Електропривод рольгангів: основні відомості, режими, типи.



РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ У ВЕНТИЛЬНОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ

3.1. Регулювання струму в нереверсивних електроприводах

У тиристорних електроприводах можуть виникати два принципово різних режими струму: режим неперервного струму і режим переривистого струму. *Режим неперервного струму* є основним робочим режимом, коли не виникає безструмової паузи. *Режим переривистого струму* виникає при досягненні ЕРС двигуна значень, близьких до напруги живлення (наприклад, режим холостого ходу).

Режим неперервного струму. Структурна схема, що відповідає режиму неперервного струму, показана на рис. 3.1.

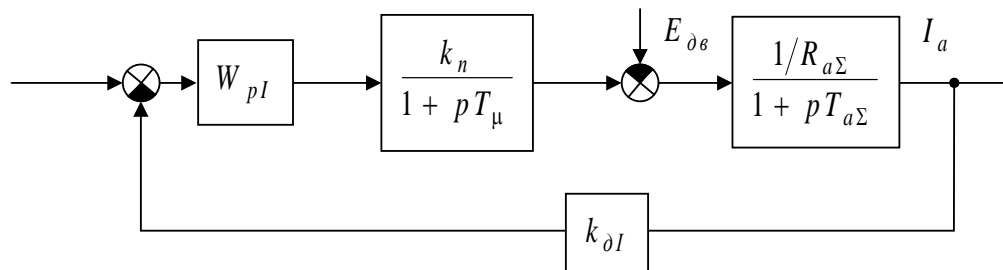


Рис. 3.1. Система регулювання струму

Розгляд контуру регулювання струму може проводитись з урахуванням або без урахування впливу зворотного зв'язку по ЕРС двигуна. Впливом ЕРС двигуна нехтують за умови значного перевищення електромагнітної сталої часу над електромагнітною сталою часу.

В режимі неперервного струму при налагодженні контуру на технічний оптимум регулятор струму вибирають пропорційно-інтегральної структури (ПІ)

$$W_{pI}(p) = \frac{pT_2 + 1}{pT_1}, \quad (3.1)$$

де $T_2 = T_{a\Sigma}$, $T_{a\Sigma}$ – сумарна електромагнітна стала часу якірного кола, T_1 – стала часу інтегрування регулятора.

Параметр регулятора T_1 визначається через частоту зрізу контуру струму ω_{cI} . За технічним оптимумом частота зрізу дорівнює $1/(2T_\mu)$. При $\omega_{cI} = 1/(2T_\mu)$ перерегулювання σ досягає значення 4,3 %, а час першого досягнення заданого рівня t_{nd} дорівнює $4,7T_\mu$. З іншого боку ω_{cI} визначається через параметри контуру струму

$$\omega_{cI} = \frac{k_n k_{\partial I}}{T_1 R_{a\Sigma}}, \quad (3.2)$$

де k_n – коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача, $k_{\partial I}$ – коефіцієнт підсилення датчика струму, $R_{a\Sigma}$ – сумарний опір якріного кола.

Задача 3.1. Визначити параметри ПІ-регулятора струму при налагодженні контуру струму на технічний оптимум і відомих параметрах електропривода.

Двигун: $P_H = 1000$ кВт, $\omega_H = 33$ рад/с, $U_H = 440$ В, $I_{aH} = 2460$ А, $I_{a,max} = 2I_{aH}$, $J_\Sigma = 1200$ кг·м², $R_a = 0,009$ Ом, $2p = 8$.

Вентильний перетворювач: $U_{dH} = 930$ В, $I_{dH} = 2500$ А, опорна напруга СІФК – косінусоїдальна, $U_{on,max} = 10$ В, $T_\mu = 0,004$ с.

Згладжувальні реактори: $L_p = 0,32$ мГн, $P_p = 2,5$ кВт.

Силовий трансформатор: $U_2 = 900$ В, $u_k = 7,2\%$, $P_a = 19,7$ кВт, $m = 3$.

Еквівалентний приведений опір фази вторинної обмотки живлячих трансформаторів вищого рівня $R_e = 0,02$ Ом, еквівалентна приведена індуктивність фази вторинної обмотки живлячих трансформаторів вищого рівня $L_e = 0,04$ мГн.

Розв'язання задачі. Знайдемо параметри електропривода, що входять до формули (3.2).

$$R_\phi = \frac{P_a}{2I_{dH}^2} = \frac{19,7 \cdot 10^3}{2 \cdot 2500^2} = 0,0016 \text{ Ом,}$$

$$R_p = \frac{P_p}{I_{dH}^2} = \frac{5 \cdot 10^3}{2500^2} = 0,0004 \text{ Ом.}$$

$$R_{a\Sigma} = R_a + 2R_p + 2R_\phi + 2R_e = 0,009 + 2 \cdot 0,0004 + 2 \cdot 0,0016 + 0,02 = 0,033 \text{ Ом.}$$

$$E_{d0} = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{900 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \frac{2\pi}{6} = 1215 \text{ В.}$$

$$L_\phi = \frac{\pi \cdot u_k \cdot E_{d0}}{m \cdot \omega_0 \cdot I_{dH}} = \frac{3,14 \cdot 0,0072 \cdot 1215}{6 \cdot 314 \cdot 2500} = 0,0058 \text{ мГн.}$$

$$L_a = \frac{\pi U_H}{20p \omega_H I_H} = \frac{\pi \cdot 440}{20 \cdot 4 \cdot 33 \cdot 2460} = 0,21 \text{ мГн.}$$

$$L_{a\Sigma} = L_a + 2L_p + 2L_\phi + 2L_e = 0,21 + 2 \cdot 0,0058 + 2 \cdot 0,32 + 2 \cdot 0,04 = 0,94 \text{ мГн.}$$

$$T_{a\Sigma} = \frac{L_{a\Sigma}}{R_{a\Sigma}} = \frac{0,94 \cdot 10^{-3}}{33 \cdot 10^{-3}} = 0,028 \text{ с.}$$

$$k_n = \frac{E_{d0}}{U_{on,max}} = \frac{1215}{10} = 121,5.$$

$$\text{Приймаючи } U_{\partial I} = 9 \text{ В при } I_{a,max}, \text{ маємо } k_{\partial I} = \frac{U_{\partial I}}{I_{a,max}} = \frac{9}{2,25 \cdot 2500} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ В/А.}$$

При перерегулюванні 4,3% (технічний оптимум) $\omega_{cI} = \frac{1}{2T_{\mu}} = \frac{1}{2 \cdot 0,004} = 125 \text{ с}^{-1}$.

$$T_2 = 2T_{\mu} = 2 \cdot 0,004 = 0,008 \text{ с}$$

З формули (3.2) випливає

$$T_1 = \frac{k_n k_{\partial I}}{\omega_{cI} R_{a\Sigma}} = \frac{121,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{125 \cdot 0,033} = 0,0472 \text{ с}.$$

Визначення ІІІ-структури регулятора струму виконується без урахування впливу ЕРС двигуна. Однак наявність природного негативного зв'язку за ЕРС двигуна впливає на статичні та динамічні характеристики контуру струму, причому цей вплив збільшується при зменшенні електро-механічної сталої часу. Тому використання ІІІ-структури регулятора призводить до статизму, що визначається формулою

$$\varepsilon_i = \frac{\omega_{cI}^{-1}}{T_M + \omega_{cI}^{-1}}, \quad (3.3)$$

де T_M – електромеханічна стала часу електропривода.

Крім того, вплив ЕРС збільшує перерегулювання струму в перехідному процесі приблизно на значення, що визначається формулою (3.3).

Вплив ЕРС при $T_M \geq T_{a\Sigma}$ на динамічні характеристики незначний. В протилежному випадку необхідне зменшення впливу ЕРС на характеристики електропривода. Для цього використовують різні методи.

Повне виключення впливу ЕРС забезпечується додаванням позитивного сигналу, пропорційного ЕРС, до вихідного сигналу регулятора струму. Більш частіше використовують перенесення сигналу, що компенсує, на вхід регулятора струму. При цьому цей сигнал необхідно попередньо пропустити через ланку з передаточною функцією, зворотною по відношенню до передаточної функції регулятора струму. Слід мати на увазі, що при формуванні сигналу ЕРС через напругу та струм двигуна, треба враховувати інерційність ланки фільтру датчика ЕРС, яка досягає сумарного значення електромагнітної сталої часу кола якоря.

При регулюванні потоку збудження двигуна слід враховувати відповідну зміну передаточного коефіцієнта кола компенсації.

Інший підхід до компенсації не потребує виміру ЕРС. Для компенсації ЕРС потрібно реалізувати схему (рис.3.2). При цьому $T_3 = T_M + \omega_{cI}^{-1}$, де T_M – стала часу інерційної ланки датчика ЕРС.

Для зменшення статичної та динамічної похибки пропонується $T_M = \omega_{cI}^{-1}$.

Через те що $T_{a\Sigma} \gg \omega_{cI}^{-1}$, передаточну функцію W_{pI} рекомендується брати пропорційною з коефіцієнтом підсилення $T_{a\Sigma}/T_1$.

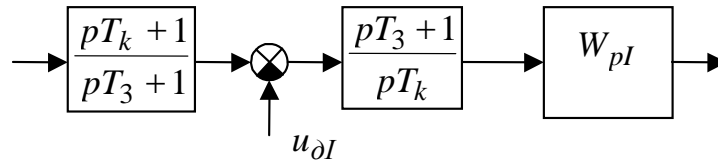


Рис.3.2. Компенсація впливу ЕРС двигуна

Режим переривистого струму. Наявність зони переривистого струму характерна як для реверсивних, так і для нереверсивних приводів. Найбільш гостро проблема переривистого струму стоїть у приводах з підвищеними вимогами до швидкодії, тому що в цьому режимі виникають певні труднощі з забезпеченням задовільної динаміки.

Зона переривистих струмів складає в електроприводах зі згладжувальними реакторами у колі якоря 5...10%, а при відсутності реактора 20...30% номінального струму якоря.

В режимі переривистого струму середнє значення струму, що відповідає заданому куту регулювання α , встановлюється з першого такту випрямлення, тому що кожний імпульс струму починається при нульових початкових умовах. Тому, в цих умовах контур струму представляється неінерційним, а тиристорний перетворювач має суттєво знижений коефіцієнт підсилення. Якщо в такому режимі передаточну функцію регулятора не корегувати, то частота зрізу контуру зменшується у γ_{nc} разів

$$\gamma_{nc} = \frac{\lambda^2 \sqrt{1 - \delta^2}}{4\omega_0 T_{a\Sigma} \sin \alpha \sin(\pi/m)}, \quad (3.4)$$

де λ – кутовий інтервал протікання струму, ω_0 – кругова частота мережі живлення, m – пульсність тиристорного перетворювача, $\delta = E_{d0} \cos \alpha / U_{\max}$, E_{d0} – максимальна випрямлена ЕРС тиристорного перетворювача, U_{\max} – амплітудне значення напруги в контурі тиристорів, що включаються.

Граничному режиму переривистого струму відповідає значення $\lambda_{cp} = 2\pi/m$.

При визначенні структури регулятора струму в режимі переривистого струму необхідно враховувати той факт, що індуктивний опір якорного кола проявляє себе як деякий фіктивний опір $R_\phi \gg R_{a\Sigma}$, а електромагнітна стала часу кола якоря не впливає на перехідний процес (рис. 3.3). Тому передаточна функція регулятора струму в режимі переривистого струму повинна мати І-структуру

$$W_{pI}(p) = \frac{1}{pT_1}, \quad (3.5)$$

де T_1 визначається через ω_{cI} .

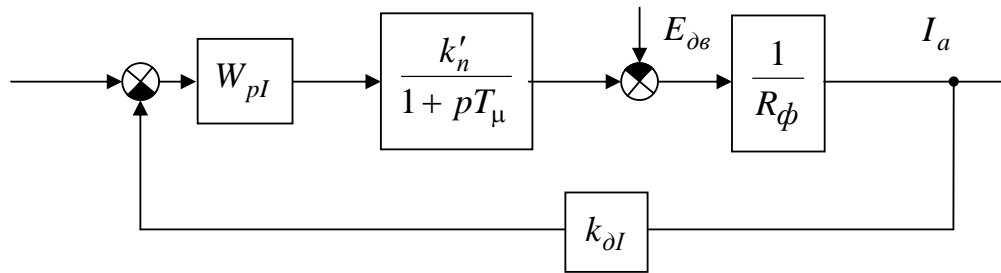


Рис. 3.3. Система регулювання в режимі переривистого струму

$$\omega_{cI} = \frac{k'_n k_{\partial I}}{T_1 R_{\phi}}, \quad (3.6)$$

де k'_n – коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача в режимі переривистого струму.

Фіктивне значення опору R_{ϕ} суттєво залежить від λ і змінюється від $R_{\phi} = \infty$ при $\lambda=0$ до $R_{\phi} = m\omega_0 L_{a\Sigma} / \pi$, де ω_0 – кругова частота живлячої напруги, $L_{a\Sigma}$ при $\lambda_{cp} = 2\pi/m$.

3.2. Способи адаптації до режиму переривистого струму

Через підвищені вимоги до швидкодії та інших показників якості перехідних процесів сучасних металургійних електроприводів, негативний вплив зони переривистого струму на ці показники компенсується використанням різних способів адаптації. Відомі схеми пристроїв адаптації поділяються на два види:

- використання адаптивних регуляторів, що змінюють структуру регулятора струму для адаптації струмового контуру до зони переривистого струму;

- використання зворотних зв'язків, які адаптують структуру системи регулювання до зони переривистого струму.

Регулятори з переключенням структур. Регулятори цього типу перестроюють свою структуру при переході із зони неперервного струму в зону переривистого. Критерієм зміни структури є незмінність передаточної функції розімкнутого контуру струму. Тому регулятор струму змінює свою ІІІ-характеристику в зоні неперервного струму на І-характеристику в зоні переривистого струму. При цьому стала інтегрування регулятора змінюється у $R_{\phi} K_n / (R_a K'_n)$ разів. Приклади схемної реалізації адаптивних регуляторів з переключенням структури показані на рис. 3.4...рис.3.6.

Регулятор на рис.3.4 складається з двох частин: незмінної та змінної. Незмінна частина виконана на підсилювачі ААІ з І характеристикою

$$W_{pI}^H(p) = \frac{1}{C2R6}. \quad (3.7)$$

Змінна частина виконана на підсилювачі $AA2$. У режимі неперервного струму контакт SA чутливого елемента розімкнутий й передаточна функція змінної частини має вигляд

$$W_{pI}^{3M}(p) = \frac{K(1 + pT_{a\Sigma})}{1 + pT_1}, \quad (3.8)$$

$$\text{де } K = \frac{R3(R2 + R4)}{R1(R2 + R3 + R4)}, \quad T_a = C1 \left(R5 + \frac{R2R4}{R2 + R4} \right),$$

$$T_1 = C1 \left(R5 + \frac{R2R4}{R2 + R3 + R4} \right).$$

В режимі переривистого струму контакт SA чутливого елемента замкнутий й передаточна функція змінної частини стає

$$W_{pI}^{3M}(p) = K', \quad (3.9)$$

де $K' = R3/R1$.

Таким чином, регулятор струму змінює свою характеристику з ПІ на І, а його коефіцієнт підсилення збільшується у K'/K рази.

На рис. 3.5 регулятор виконаний на трьох підсилювачах $A1, A2, A3$. У режимі неперервного струму чутливі елементи $SA1$ і $SA2$ замкнуті, а регулятор струму виконує функції ПІ регулятора

$$W_{pI}(p) = \frac{1 + pT_2}{pT_1}, \quad (3.10)$$

де $T_2 = R4C1$, $T_1 = R4C1/K_{A1}$, $K_{A1} = R2/R1$.

У режимі переривистого струму контакти чутливих елементів $SA1$ і $SA2$ розімкнуті і на вхід операційного підсилювача включається інерційна ланка $R6-C2$, компенсуючи ланку $R4-C1$, що форсує. Таким чином, регулятор струму змінює свою пропорційно-інтегральну характеристику на суто інтегральну

$$W_{pI}(p) = \frac{1}{pT_3}, \quad (3.11)$$

де $T_3 = R4R1C1/(R2 + R3)$.

Запропонований регулятор струму менш чутливий до перешкод у порівнянні з регулятором (рис.3.4).

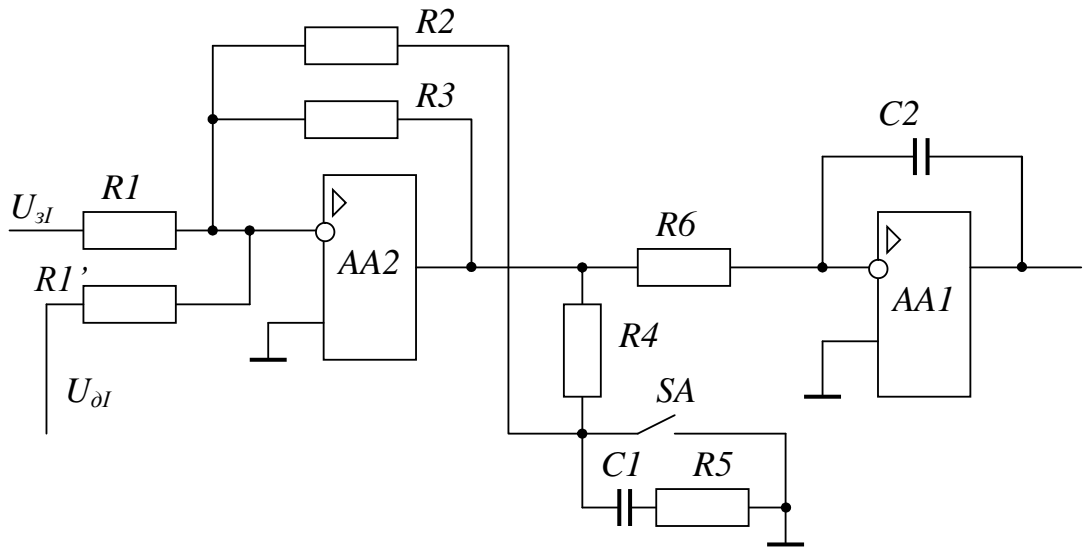


Рис. 3.4. Схема адаптивного регулятора фірми АЕГ

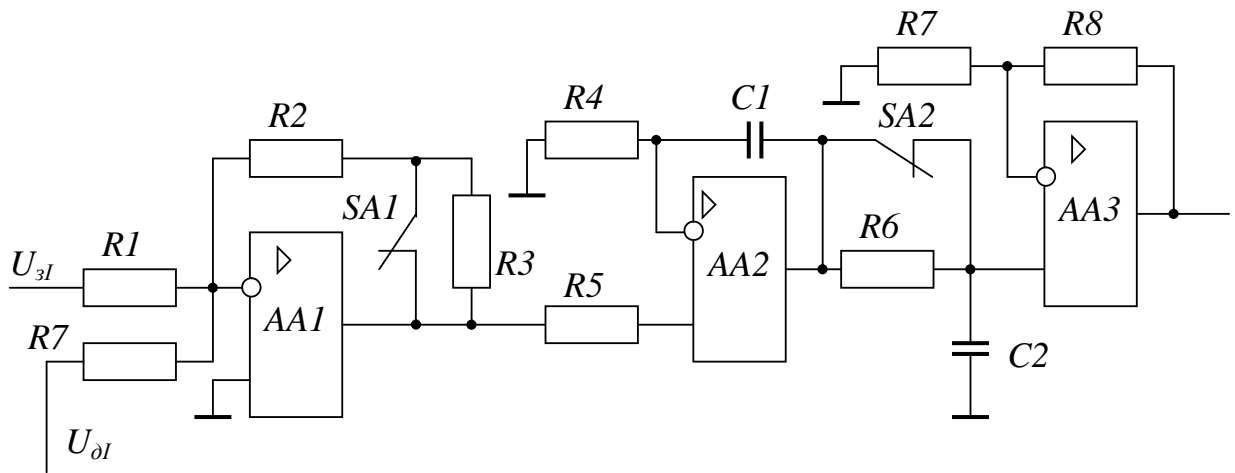


Рис. 3.5. Схема адаптивного регулятора фірми "Сіменс"

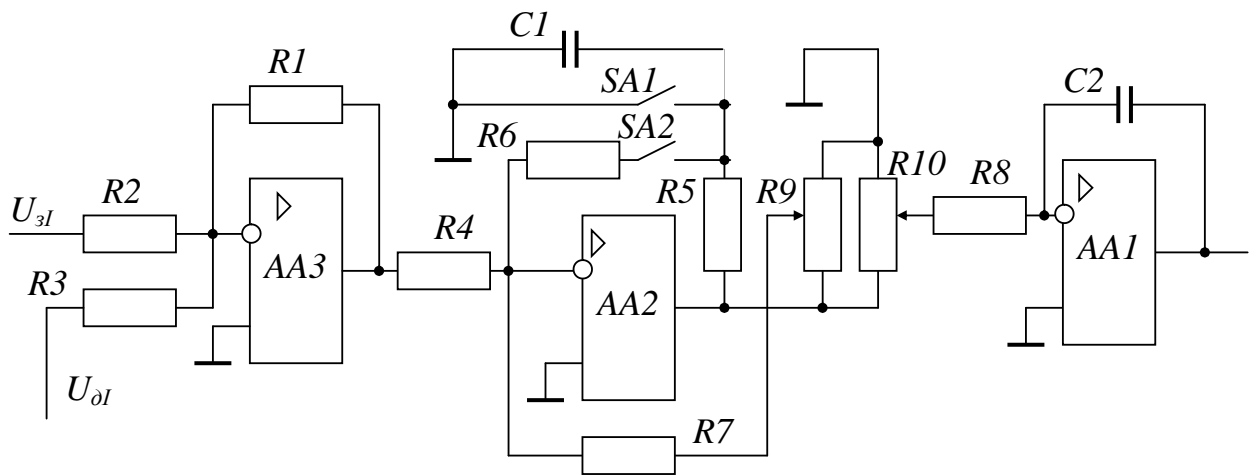


Рис. 3.6. Схема адаптивного регулятора фірми "Шкет"

Адаптивний регулятор на рис.3.6 виконаний з незмінної частини – операційний підсилювач $AA1$, який має інтегральну характеристику, та змінної частини на операційному підсилювачі $AA2$. Крім того операційний підсилювач $AA1$ слугує суматором.

В зоні неперервного струму за допомогою контактів чутливих елементів $SA1$ (розімкнений) і $SA2$ (замкнутий) формується ПІ-структура регулятора струму на операційному підсилювачі $AA2$. Відповідно до схеми (рис.3.6)

$$W_{pl}^{3M}(p) = \frac{K(1 + pT_1)}{1 + pT_2}, \quad (3.12)$$

$$\text{де } K = \frac{R7(R5 + R6)}{R4(R5 + R6 + R7)}, \quad T_1 = C1 \left(\frac{R5R6}{R5 + R6} \right), \quad T_2 = C1 \left(\frac{R5R6}{R5 + R6 + R7} \right).$$

Регулюванням $R9$ змінюється загальний опір зворотного зв'язку $AA2$ з опором $R7$. Збільшенням цього опору досягається $T_2 \approx 0$ і реалізується ПІ-характеристика регулятора.

При переході у зону переривистого струму контакт $SA1$ замкнутий і $SA2$ розімкнений. У цьому випадку

$$W_{pl}^{3M}(p) = K', \quad (3.13)$$

де $K' = R7/R4$.

Регулятори без переключення структур. До варіантів схемного рішення таких регуляторів струму відносяться: 1) схеми з внутрішнім контуром напруги; 2) схеми з двома жорсткими зв'язками за струмом; 3) схеми із форсуючою ланкою у зворотному зв'язку за струмом; 4) схеми із гнучким та жорстким зворотним зв'язком за струмом; 5) схема з еталонною моделлю.

Система регулювання струму з внутрішнім контуром напруги. Система регулювання струму з внутрішнім контуром ЕРС тиристорного перетворювача показана на рис.3.7. При настроюванні внутрішнього контуру напруги на технічний оптимум виходить ПІ-регулятор

$$W_{pU}(p) = \frac{1 + pT_\phi}{pT_e}, \quad (3.14)$$

де $T_e = 2T_\mu k_n k_{\partial U}$.

При апроксимації ланки фільтра інтегральною ланкою з тією ж сталою часу маємо пропорційний регулятор напруги з коефіцієнтом підсилення $k_{pU} = T_\phi/T_e$. Для цього випадку передаточна функція замкнутого внутрішнього контуру напруги при нехтуванні членами поліномів чисельника та знаменника другого порядку малості має вигляд

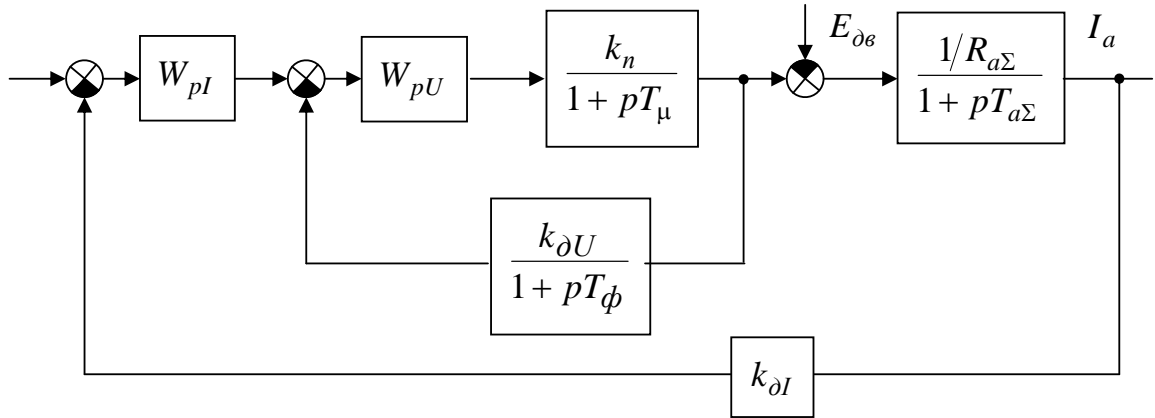


Рис. 3.7. Система регулювання струму з контуром ЕРС перетворювача

$$W_U^{зам}(p) = \frac{k_{pU} k_n}{1+k_U} \cdot \frac{1+pT_{\phi}}{1+pT'_{\phi e}}, \quad (3.15)$$

де $T'_{\phi e} = \frac{T_{\phi} + T_{\mu}}{1+k_U}$, $k_U = k_{pU} k_n k_{\partial U}$.

Врахуємо, що $1+k_U \approx k_U$. Якщо виконати умову $T_{\phi} = T_{a\Sigma}$, то форсуюча ланка з відповідною сталою часу в режимі неперервного струму компенсуватиме дію ланки якірного кола з найбільшою сталою часу $T_{a\Sigma}$. При цьому у контурі струму залишиться некомпенсованою стала часу $T_{\phi e}/k_U$. Компенсація цієї сталої часу забезпечується регулятором струму з передаточною функцією за формулою (3.1), де $T_2 = T_{\phi e}/k_U$. При цьому частота зрізу контуру струму дорівнюватиме

$$\omega_{cI} = \frac{k_{\partial I}}{T_1 k_{\partial U} R_{a\Sigma}}. \quad (3.16)$$

В режимі переривистого струму середнє значення ЕРС вентильного перетворювача дорівнює ЕРС двигуна і слідує їй через відсутність електромагнітної інерційності якірного кола. Тому можна вважати, що зворотній зв'язок по напрузі зникає, якщо зворотній зв'язок по ЕРС двигуна достатньо інерційний. При цьому частота зрізу стає

$$\omega'_{cI} = \frac{k'_n T'_{\phi e} k_{\partial I} k_{pU}}{T_1 R_{\phi}}. \quad (3.17)$$

Порівнюючи формулу (3.17) з формулою (3.6), бачимо, що при наявності внутрішнього контуру напруги відношення частот зрізу контуру струму у зоні переривистих струмів та в неперервному режимі дорівнює $T_{\phi e} \cdot R_{a\Sigma} \cdot k_n' / (k_n R_{\phi})$.

На практиці зворотній зв'язок реалізується не з ЕРС перетворювача, а з напруги. Такий зв'язок реалізується досить просто, але при цьому ускладнюється система регулювання. Розглянемо систему регулювання із внутрішнім зв'язком за напругою двигуна. З відомого рівняння для якірного кола двигуна випливає, що сигнал напруги, який знімається з резистивного дільника (рис. 3.8), пропорційний напрузі двигуна

$$U_{\delta e}(p) = E_{\delta e}(p) + I_a(p)R_a(1 + pT_a). \quad (3.18)$$

Якщо не враховувати інерційність зворотного зв'язку з ЕРС, або його вплив компенсувати, то зміна напруги двигуна у динаміці буде відповідати зміні струму, яка форсується ланкою $R_a(1 + pT_a)$. Таким чином, зворотний зв'язок з напруги (ЗЗН) реалізується через форсуючу ланку у зворотному зв'язку за струмом двигуна. У загальному випадку у колі зворотного зв'язку з форсуючою ланкою може стояти фільтр (рис.3.9).

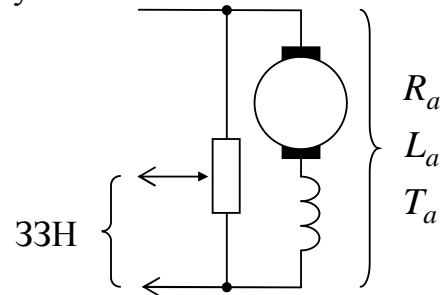


Рис. 3.8. Зняття сигналу напруги двигуна

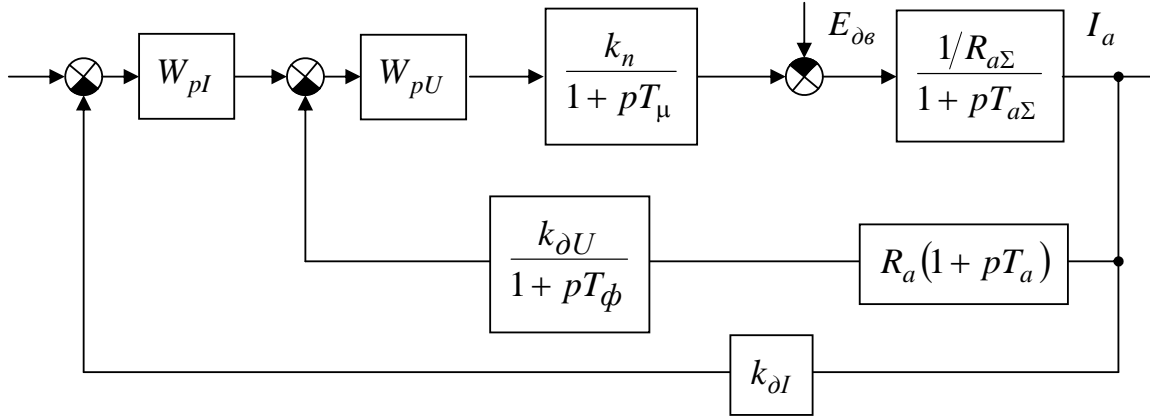


Рис. 3.9. Система регулювання струму з форсуючою ланкою у зворотному зв'язку за струмом

Якщо прийняти П-структуру внутрішнього регулятора, тобто $W_{pU}(p) = k_{pU}$, а також фільтром компенсувати дію форсуючої ланки у зворотному зв'язку внутрішнього контуру шляхом вибору $T_{\phi} = T_a$, тоді передаточна функція розімкнутого контуру струму при замкнутому внутрішньому буде мати наступний вигляд (стала часу T_{μ} приводиться до великої сталої часу $T_{a\Sigma}$)

$$W_I^{poz}(p) = W_{pI}(p) \cdot \frac{k_{pU} k_n k_{\partial I}}{(1 + k_u) R_{a\Sigma}} \cdot \frac{1}{1 + p T_{a\Sigma} / (1 + k_u)}, \quad (3.19)$$

де $k_u = k_{pU} k_n k_{\partial U} R_a / R_{a\Sigma}$.

При передаточній функції виду (3.19) необхідно вибирати регулятор струму з передаточною функцією (3.10). При цьому $T_2 = T_{a\Sigma} / (1 + k_u)$, а частота зрізу

$$\omega_{cI} = \frac{k_{pU} k_n k_{\partial I}}{(1 + k_u) R_{a\Sigma} T_1}. \quad (3.20)$$

$$\text{При } k_u \gg 1 \quad \omega_{cI} = \frac{k_{\partial I}}{T_1 k_{\partial U} R_a}.$$

Для визначення параметрів регуляторів, як завжди, слід задатися значенням частоти зрізу.

Для вибору коефіцієнта підсилення k_{pU} слід розглянути розімкнутий внутрішній контур напруги. Тоді при $T_\phi = T_a$ та приведенні сталої часу T_μ до великої сталої часу $T_{a\Sigma}$, маємо

$$W_U^{poz}(p) = \frac{k_u}{(1 + p T_{a\Sigma})}. \quad (3.21)$$

Частота зрізу розімкнутого внутрішнього контуру напруги з передаточною функцією (3.21)

$$\omega_{cU} = \frac{k_u}{T_{a\Sigma}}. \quad (3.22)$$

Для отримання достатнього запасу стійкості приймають $\omega_{cU} = 700 - 1000$ рад/с.

Задача 3.2. За умов задачі 3.1 визначити параметри пропорційного регулятора внутрішнього по відношенню до контуру струму контуру напруги.

Розв'язання задачі. Оскільки швидкодія контуру струму визначається частотою зрізу $\omega_{cI} = 125$ с⁻¹, а швидкодія внутрішнього контуру напруги повинна бути вищою, приймаємо із врахування рекомендацій $\omega_{cU} = 150$ с⁻¹. Тоді

$$k_u = \omega_{cU} \cdot T_{a\Sigma} = 150 \cdot 0,028 = 42,$$

$$k_{\partial U} = \frac{10}{1215} = 0,0082.$$

Виходячи з формули для $k_u = k_{pU} k_n k_{\partial U} R_a / R_{a\Sigma}$, маємо:

$$R_a = 0,009 \text{ Ом}, \quad R_{a\Sigma} = 0,033 \text{ Ом}, \quad k_n = 121,5.$$

$$k_{pU} = \frac{k_u R_{a\Sigma}}{R_a k_n k_{\partial U}} = \frac{42 \cdot 0,033}{0,009 \cdot 121,5 \cdot 0,0016} = 792,18.$$

Система з двома жорсткими зв'язками по струму. Через компенсацію фільтром форсуючої ланки із сталою часу T_a (рис. 3.9) вихідний сигнал фільтра є реакцією аперіодичної ланки із сталою часу $T_{a\Sigma}$ на зміну ЕРС вентильного перетворювача. Тому цей сигнал можна замінити на сигнал, пропорційний струму якоря (рис. 3.10).

При відсутності фільтрів на вході СІФК, тобто $T_\mu \rightarrow 0$, і використанні безінерційних датчиків струму можна отримати достатньо високу швидкість внутрішнього контуру струму. Частота зрізу контуру при цьому може досягати 1000 рад/с.

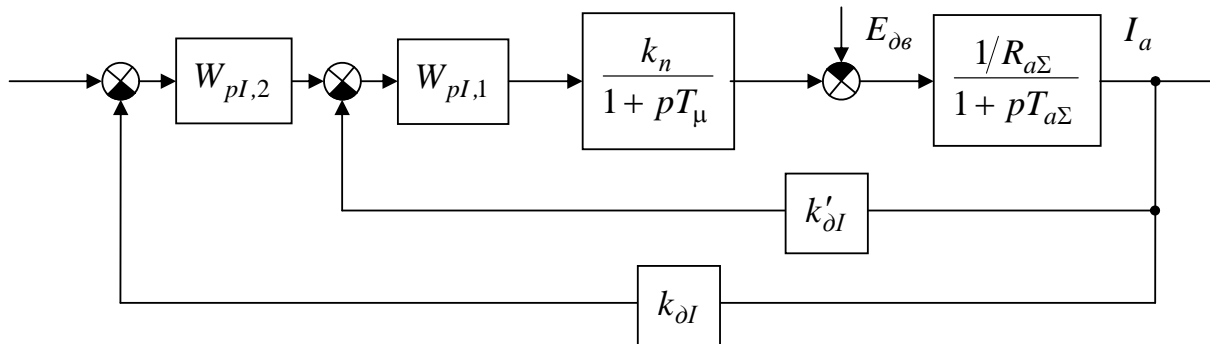


Рис. 3.10. Система регулювання струму з двома жорсткими зв'язками за струмом

Замкнутий швидкодіючий внутрішній контур струму має передаточну функцію

$$W_{I,1}^{зам}(p) = \frac{K_\Sigma / (1 + K_\Sigma)}{k'_{\partial I} \left(1 + p \frac{T_{a\Sigma}}{1 + K_\Sigma} \right)}, \quad (3.23)$$

де $K_\Sigma = W_{pI,1}(p) k_n k'_{\partial I} / R_{a\Sigma}$.

Для простоти приймається пропорційний регулятор струму внутрішнього контуру, тобто $W_{pI,1}(p) = k_{pI,1}$. Тоді $K_\Sigma = k_{pI,1} k_n k'_{\partial I} / R_{a\Sigma}$. Забезпечуючи за рахунок регулятора $K_\Sigma \gg 1$, можна спростити передаточну функцію (3.23)

$$W_{I,1}^{зам}(p) = \frac{1}{k'_{\partial I} (1 + pT'_{a\Sigma})}, \quad (3.24)$$

де $T'_{a\Sigma} = \frac{T_{a\Sigma}}{K_\Sigma}$.

Через значну величину K_Σ стала часу $T'_{a\Sigma}$ має досить мале значення, а контур струму – високу швидкість.

Якщо забезпечується висока швидкодія внутрішнього контуру, то характер перехідного процесу струму буде визначатися зовнішнім контуром струму. У цьому контурі відсутні сталі часу, які потребують компенсації, і тому регулятор зовнішнього контуру струму з точки зору технічного оптимуму може бути інтегральним з передаточною функцією

$$W_{pI,2}(p) = \frac{k'_{\partial I}}{2T'_{a\Sigma} \cdot k_{\partial I} \cdot p}. \quad (3.25)$$

Через те, що у режимі переривистих струмів суттєво зменшується підсилення контуру струму, компенсація цього зменшення забезпечується умовою

$$K_{\Sigma} \geq 1000T_{a\Sigma}. \quad (3.26)$$

Схема (рис.3.10) є достатньо завадостійкою. Переваги схеми (рис.3.10) над схемою (3.9) полягають у відсутності датчика напруги, а також зв'язку за ЕРС двигуна. Недоліком є відсутність лінеаризації характеристики вентильного перетворювача, яка досягається за рахунок зворотного зв'язку за напругою перетворювача.

Система із форсуючою ланкою у зворотному зв'язку за струмом. У схемі (рис.3.9) можна відмовитися від фільтру у зворотному зв'язку із форсуючою ланкою та зовнішнього контуру регулювання струму. При цьому буде реалізований тільки зворотний зв'язок за напругою (рис.3.11).

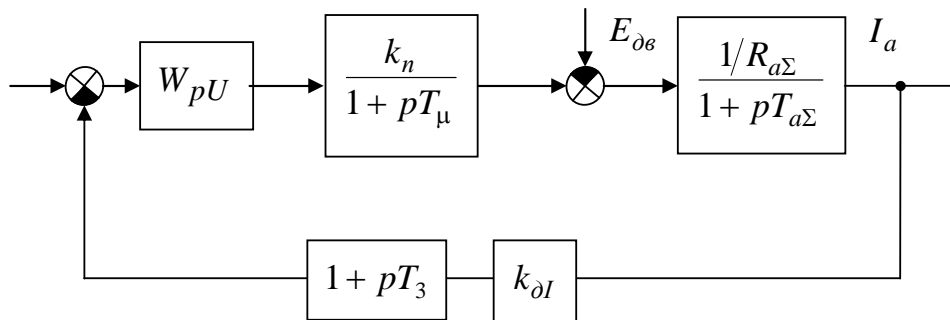


Рис. 3.11. Система із форсуючою ланкою у зворотному зв'язку за струмом

Використання форсуючої ланки у колі зворотного зв'язку за струмом дозволяє зберегти незмінною настроювання регулятора як у режимі неперервного, так і переривистого струму за рахунок того, що при виконанні умови

$$W_{np}(p) \cdot W_{ze}(p) \gg 1, \quad (3.27)$$

де $W_{np}(p) = W_{pU}(p) \cdot \frac{k_n}{1 + pT_\mu} \cdot \frac{1/R_{a\Sigma}}{1 + pT_{a\Sigma}}$, $W_{зв}(p) = k_{\partial I} \cdot (1 + pT_3)$,

маємо замкнуту передаточну функцію контуру

$$W_I^{зам}(p) = \frac{W_{np}(p)}{1 + W_{np}(p) \cdot W_{зв}(p)} \approx \frac{1}{W_{зв}(p)} = \frac{1}{k_{\partial I}(1 + pT_3)}. \quad (3.28)$$

Таким чином, перехідний процес у контурі струму визначається сталою часу T_3 .

Якщо умова (3.27) не виконується, то передаточна функція замкненого контуру без урахування внутрішнього зворотного зв'язку з ЕРС

$$W_I^{зам}(p) = \frac{1/k_{\partial I}}{p^2 \left(\frac{T_\mu \cdot T_{a\Sigma}}{K \cdot W_{pU}(p)} \right) + p \left(\frac{T_{a\Sigma} + T_\mu}{K \cdot W_{pU}(p)} + T_3 \right) + \left(1 + \frac{1}{K \cdot W_{pU}(p)} \right)}, \quad (3.29)$$

де $K = \frac{k_{\partial I} \cdot k_n}{R_{a\Sigma}}$.

При використанні передаточної функції регулятора $W_{pU}(p)$ вигляду (3.1) у прямому каналі регулювання з'являється форсуюча ланка $(1 + pT_2)$, що негативно впливає на якість перехідного процесу струму. Тому використовується передаточна функція регулятора виду

$$W_{pU}(p) = \frac{1}{pT_1}. \quad (3.30)$$

Тоді передаточна функція $W_I^{зам}(p)$ матиме вид

$$W_I^{зам}(p) = \frac{1/k_{\partial I}}{p^3 \left(\frac{T_\mu \cdot T_{a\Sigma} \cdot T_1}{K} \right) + p^2 \left(\frac{(T_{a\Sigma} + T_\mu) \cdot T_1}{K} \right) + p \left(T_3 + \frac{T_1}{K} \right) + 1}. \quad (3.31)$$

Час перехідного процесу у системі з передаточною функцією (3.31) з достатньою точністю визначається аперіодичною ланкою (використовується принцип нехтування змінними другого і третього рівня малості)

$$W_I^{зам}(p) = \frac{1/k_{\partial I}}{p \left(T_3 + \frac{T_1}{K} \right) + 1}. \quad (3.32)$$

Якщо при цьому виконати умову $T_3 \gg T_1/K$, то зміна коефіцієнта $K = (k_{\partial I} k_n)/R_{a\Sigma}$ у режимі неперервного струму до значення $K = (k_{\partial I} k'_n)/R_{\phi}$ у режимі переривистого струму не впливає на перехідний процес у контурі. Час перехідного процесу у контурі струму буде визначатися сталою часу T_3 .

Система із гнучким та жорстким зворотним зв'язком по струму. Для забезпечення незмінних умов оптимізації системи регулювання при зміні структури електропривода через перехід із зони переривистого струму у зону неперервного струму і у зворотному напрямку використовують, також, внутрішній гнучкий зв'язок за струмом (рис.3.12).

У запропонованій схемі адаптація до режиму переривистого струму виконується внутрішнім контуром струму при незмінності коефіцієнта підсилення зовнішнього контуру струму. При цьому необхідно забезпечити інтегральну передаточну функцію регулятора внутрішнього контуру струму

$$W_{pI,1}(p) = \frac{1}{pT_{pI,1}}. \quad (3.33)$$

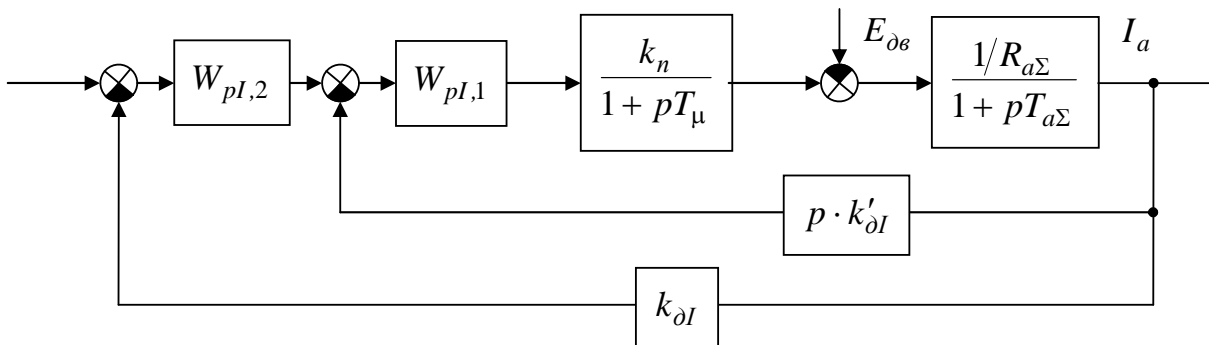


Рис. 3.12. Система регулювання струму з гнучким і жорстким зв'язками за струмом

У такому разі послідовне включення інтегральної та диференціальної ланок у розімкненому колі внутрішнього контуру струму забезпечує компенсацію їх дії. Тому внутрішній контур струму виконує регулювання миттєвого струму і в зоні переривистого струму розмикається. Зовнішній контур завдяки наявності інтегральної ланки внутрішнього регулятора в режимі переривистого струму регулює струм за його середнім значенням.

Частота зрізу розімкнутого внутрішнього контуру для режиму неперервного струму має вигляд

$$\omega_{c,1} = \frac{k_n k'_{\partial I}}{R_{a\Sigma} T_{pI,1} T_{a\Sigma}}. \quad (3.34)$$

Для визначення частоти зрізу зовнішнього контуру в режимі неперервного струму слід визначити передаточну функцію замкнутого внутрішнього контуру. При умові, що стала часу T_{μ} приводиться до великої сталої часу $T_{a\Sigma}$, маємо

$$W_{I,1}^{zam}(p) = \frac{1}{p T_1' (1 + p T_{a\Sigma}')}, \quad (3.35)$$

$$\text{де } T_1' = T_{pI,1} \frac{R_{a\Sigma}}{k_n} \left(1 + \frac{k_n k'_{\partial I}}{T_1 R_{a\Sigma}} \right), \quad T_{a\Sigma}' = \frac{T_{a\Sigma}}{1 + \frac{k_n k'_{\partial I}}{T_{pI,1} R_{a\Sigma}}}.$$

Передаточна функція зовнішнього розімкненого контуру струму має вигляд

$$W_{I,2}^{poz}(p) = W_{pI,2}(p) \cdot W_{I,1}^{zam}(p) \cdot k_{\partial I} = \frac{1}{2 T_{a\Sigma}' \cdot p \cdot (1 + p T_{a\Sigma}')}. \quad (3.36)$$

Частота зрізу зовнішнього контуру вибирається з умов оптимізації на модульний оптимум. Тому при некомпенсованій сталій часу контуру $T_{a\Sigma}'$ передаточна функція регулятора $W_{pI,2}(p)$ буде мати П-структуру

$$W_{pI,2}(p) = \frac{T_1'}{2 T_{a\Sigma}' k_{\partial I}}. \quad (3.37)$$

Система регулювання струму з еталонною моделлю. Еталонна модель в системі регулювання струму використовується для завдання певної якості перехідного процесу. Передаточна функція еталонної моделі $W_e(p)$ (рис. 3.13) відповідає бажаній реакції системи на стрибок завдання, наприклад, настроюванню на модульний оптимум. Якщо реакція системи $u_{\partial I}$ не відповідає бажаній u_e , то на вході системи імпульсно-фазового керування з'являється додатковий сигнал, який зменшує цю різницю.

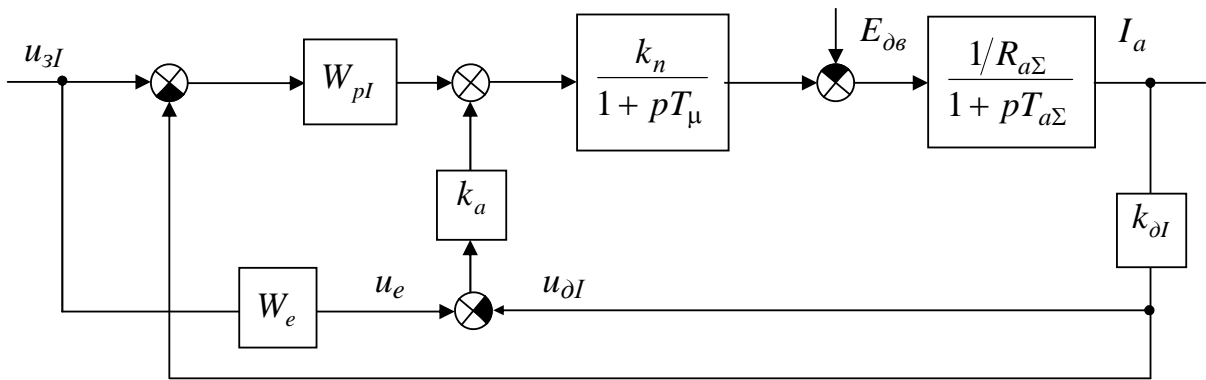


Рис. 3.13. Система регулювання струму з еталонною моделлю

Ефективність адаптації визначається допустимим значенням коефіцієнту k_a . Якщо вибрати достатньо велике значення цього коефіцієнту ($k_a \rightarrow \infty$), то сигнал реакції системи $u_{\partial I}$ буде відповідати сигналу еталонної моделі u_e через практично миттєве відпрацювання розузгодження цих сигналів $u_e - u_{\partial I}$. Тобто, виконується приблизна рівність $u_e \approx u_{\partial I}$. Тому

$$u_{\partial I}(p) \approx u_e(p) = W_e(p) \cdot u_{zI}. \quad (3.38)$$

Таким чином, час перехідного процесу при зміні керуючого сигналу u_{zI} буде визначатися частотою зрізу еталонної моделі ω_{ce} .

Якщо у режимі неперервного струму частота зрізу розімкнутого контуру струму ω_{cI} буде дорівнювати частоті зрізу еталонної моделі ω_{ce} , то система стає інваріантною до зміни керуючого впливу через те, що сигнали $u_{\partial I}$ і u_e точно відповідають один одному. Тому для режиму неперервного струму регулятор струму слід настроювати саме з урахуванням того, що контур струму повинен мати частоту зрізу еталонної моделі.

У режимі переривистого струму частота зрізу контуру струму буде зменшуватися, збільшуючи різницю сигналів $u_e - u_{\partial I}$. В залежності від значення коефіцієнту k_a визначається швидкість усунення розузгодження сигналів, але швидкість перехідного процесу струму все одно залежить від швидкодії еталонної моделі.

У той же час, наявність додаткового зв'язку за струмом через ланку k_a призводить до зміни умов оптимального настроювання системи.

Виконаємо перетворення структурної схеми (рис. 3.13) шляхом приведення схеми до одиничного зворотного зв'язку (рис. 3.14).

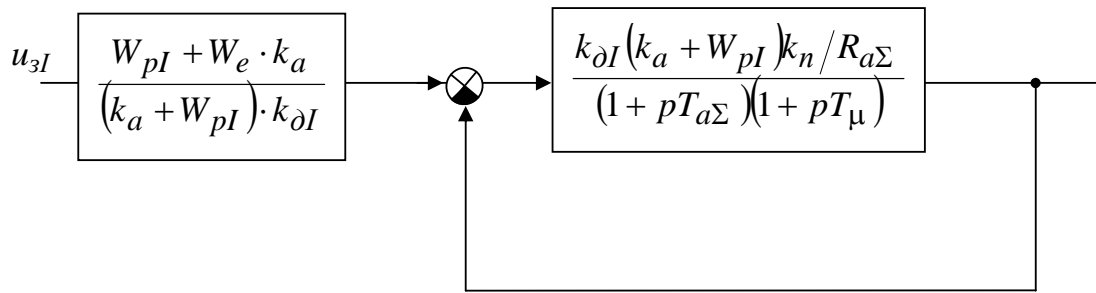


Рис. 3.14. Структурна схема (рис.3.13), приведена до одиничного зворотного зв'язку

З (рис.3.14) видно, що передаточна функція еталонної моделі впливає на характер сигналу завдання на вході системи регулювання із одиничним зворотним зв'язком. При передаточній функції регулятора струму виду (3.10) замкнута передаточна функція системи із одиничним зворотним зв'язком має характеристичне рівняння третього порядку. Таким чином, перехідний процес у такій системі в області практичного визначення її параметрів є коливальним. У спеціальній літературі визначено, що коефіцієнт k_a не повинен перевищувати значення $T_{a\Sigma}/T_2$. Прагнення отримати більший коефіцієнт k_a призводить до збільшення коливальності системи.

Вибір k_a мусить мати компромісний характер у залежності від значень параметрів системи і повинен перед настроюванням реальної системи електропривода підтвердитися шляхом моделювання.

3.3. Особливості регулювання струму в реверсивних електроприводах

Особливості керування вентильними перетворювачами. У деяких випадках технологічні умови прокатки передбачають зміну напрямку струму вентильних перетворювачів. У тиристорному перетворювачі зміна напрямку струму забезпечується встановленням двох протилежно ввімкнених комплектів тиристорів або за допомогою реверсора у якірному колі двигуна. Реверсор використовується для електроприводів малої потужності.

Двокомплектні реверсивні вентильні перетворювачі за способами керування комплектами вентилів діляться на два класи: реверсивні вентильні перетворювачі зі спільним керуванням й роздільним керуванням.

Сучасним способом керування є роздільне керування через суттєві переваги над спільним керуванням. При роздільному керуванні зменшуються габарити та вартість електроприводів, повністю виключається зрівняльний струм й, відповідно, зрівняльні реактори зі складу комплекту вен-

тилів. Тому в подальшому розглядаються особливості роботи реверсивних вентильних перетворювачів з роздільним керуванням.

До числа недоліків способу роздільного керування відносяться:

- 1) наявність зони нечутливості характеристики регулювання електропривода;
- 2) апаратна пауза;
- 3) зона переривистого струму.

Поява зони нечутливості обумовлена тим, що у деяких схемах з роздільним керуванням комплектами вентилів для узгодження характеристик регулювання початкове значення кута регулювання відрізняється від 90° . За звичай цей кут складає 120° .

Зона нечутливості суттєво впливає на роботу електропривода. Для електроприводів, що працюють в режимі струмообмеження, зона нечутливості призводить до затягування перехідного процесу струму. При завданні на швидкість і пропорційно-інтегральному регуляторі частоти обертання збільшуються перегулювання струму, динамічна похибка регулювання частоти обертання електропривода; система замикається з запізненням.

Для значного зменшення впливу нелінійності характеристики регулювання, пов'язаної з зоною нечутливості, у ряді випадків використовується негативний зворотний зв'язок з напруги перетворювача. Створюваний таким чином контур є внутрішнім по відношенню до контуру струму. Зворотній зв'язок з напруги перетворювача є суттєвим для перетворювачів з неузгодженим роздільним керуванням, коли кут узгодження характеристик регулювання складає 150° і більше. Для роздільного узгодженого керування, коли кут узгодження характеристик регулювання складає $90 \dots 120^\circ$, задовільна робота в зоні неперервних струмів забезпечується без зворотного зв'язку з напруги перетворювача.

Під час апаратної паузи, обумовленої процесом перемикання комплектів вентилів, розривається прямий канал регулювання струму якоря, а зворотний зв'язок за струмом відсутній. Це призводить до накопичення інтегральних складових сигналу на виходах регуляторів.

З метою боротьби з негативним впливом апаратної паузи у серійних тиристорних перетворювачах з роздільним керуванням встановлюються безінерційні ключі у прямому каналі регулювання частоти обертання й струму якоря, які розривають коло, що живить регулятори, на час дії апаратної паузи.

Вплив апаратної паузи збільшується ще більше при наявності внутрішнього контуру напруги перетворювача.

Зона переривистого струму характерна як для реверсивних, так і для неревверсивних електроприводів. В зоні переривистого струму виникають труднощі з забезпеченням задовільних перехідних процесів через зміну структури електропривода. Тиристорний перетворювач в режимі перери-

вистого струму є неінерційним з суттєво зменшеним відносно режиму неперервного струму коефіцієнтом передачі. Вказані особливості повинні враховуватися при створенні системи регулювання струмом електропривода.

3.4. Особливості регулювання струму в багатомостових електроприводах

Багатомостові вентильні перетворювачі використовуються для зменшення їх впливу на живлячу мережу. Регулювання випрямленої напруги у сторону зменшення супроводжується зниженням коефіцієнта потужності, що обумовлює збільшене використання реактивної потужності. Крім того, наявність вищих складових струму призводить до викривлення форми напруги мережі й можуть викликати резонансні явища у лініях електропередач. Це, й додаткові викривлення напруги мережі за рахунок явища комутації вентилів призводять до негативного впливу на інших користувачів електроенергії.

Збільшення числа фаз суттєво зменшує ефективне значення струмів вищих гармонік.

Для зменшення впливу вентильних перетворювачів на мережу використовують різні методи, наприклад, *схеми послідовного або паралельного з'єднання декількох вентильних перетворювачів*.

Суттєве зниження використання реактивної потужності й потужності викривлення можна досягти схемою послідовного з'єднання мостів (рис.3.15).

При регулюванні випрямленої напруги уверх спочатку починає знижуватися випрямлена напруга одного з мостів, який працює у інверторному режимі. Інший міст у цей час працює з мінімальним кутом керування у режимі випрямлення. Далі, при переході від інверторного режиму до режиму випрямлення напруга на виході першого моста починає зростати. Таким чином, регулювання напруги забезпечується одним мостом, а інший працює з мінімальним кутом регулювання. При такому режимі роботи мостів мінімізується використання реактивної потужності одного з мостів і знижується її загальне використання.

У загальному випадку вентильний перетворювач може мати не два, а більше послідовно включених мостів, які відрізняються не тільки випрямленою напругою, але й числом фаз та групою з'єднання трансформатора.

Через те, що у нереверсивних вентильних перетворювачах один міст працює з мінімальним і незмінним кутом регулювання, можливий варіант побудови цього моста на діодах.

У разі побудовання реверсивного вентильного перетворювача з послідовним з'єднанням мостів силова схема має вигляд (рис. 3.16).

При наявності декількох послідовно включених мостів виникає проблема керування вентилями. Роздільне управління при послідовно включених й по чергово керованих мостах забезпечується логікою сканування, яка є досить складною за алгоритмом.

Також використовуються варіанти з паралельним (рис. 3.17) та послідовно-паралельним з'єднанням мостів (рис.3.18).

В реверсивних електроприводах великої потужності при роздільному керуванні групами тиристорів існують великі струми витоку при закритих тиристорах, які можуть перевищувати струм утримання окремо взятого тиристора. Тому один або декілька тиристорів можуть знаходитись у включеному стані достатньо довго. При подачі керуючого імпульсу на тиристори протилежного напрямку реальним є виникнення зрівняльного струму. Для виключення цього режиму потрібний спеціальний алгоритм переключень тиристорів.

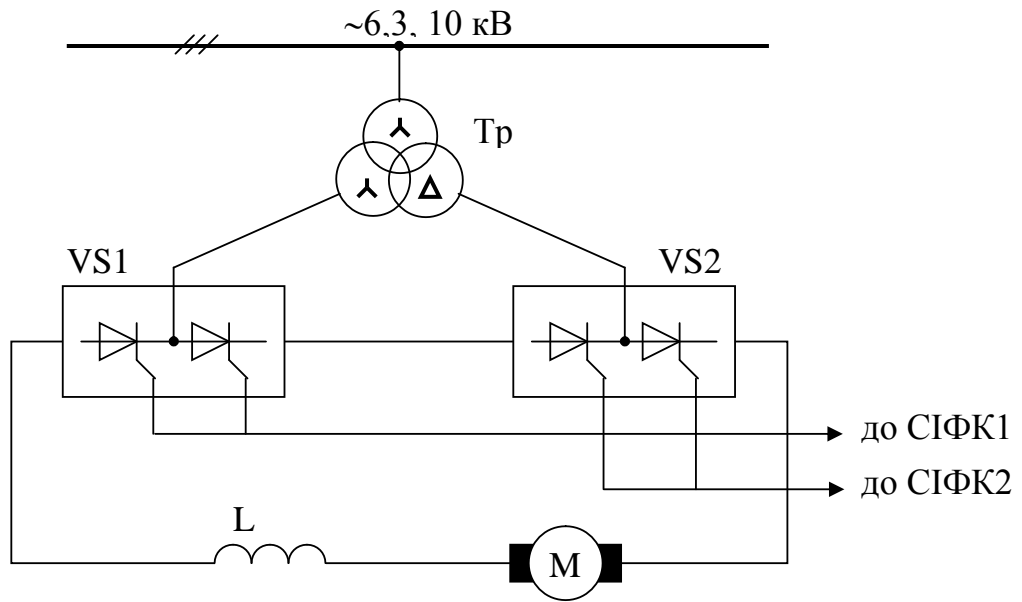


Рис. 3.15. Вентильний перетворювач з послідовним з'єднанням мостів

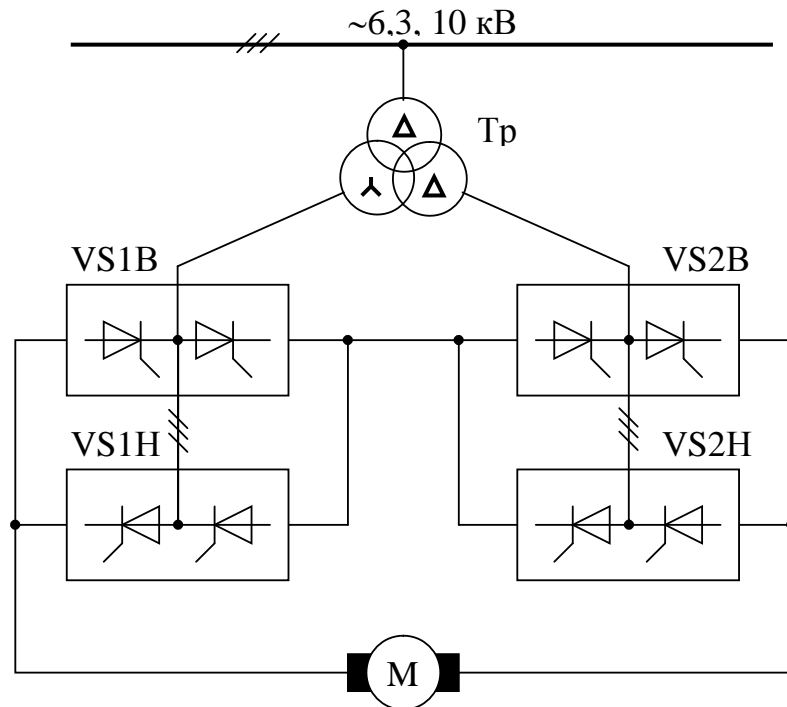


Рис. 3.16. Реверсивний вентильний перетворювач з послідовним з'єднанням мостів

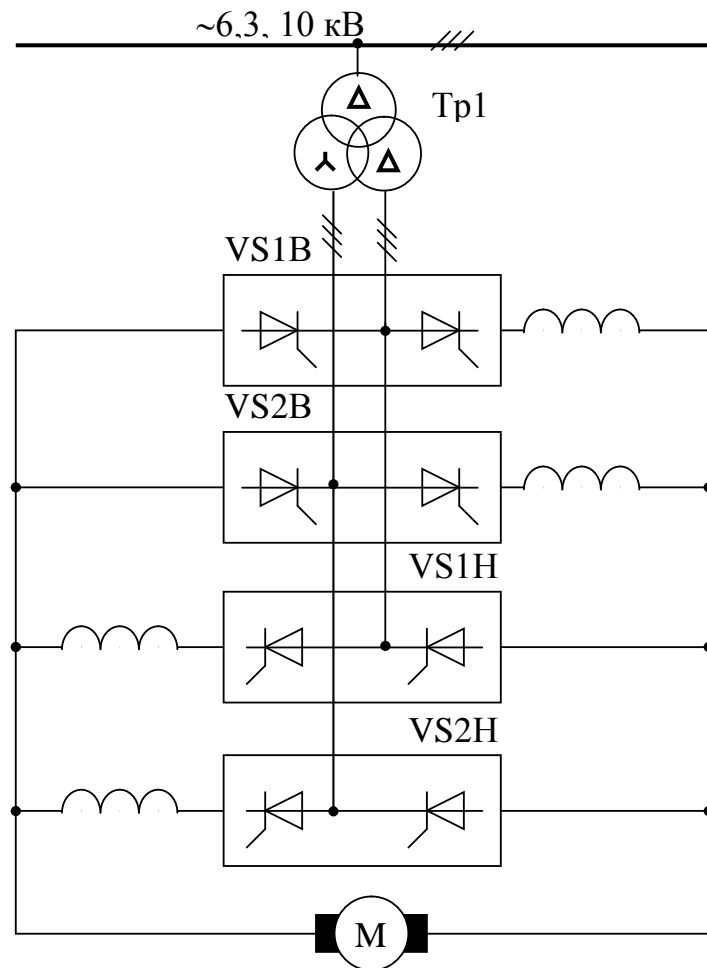


Рис. 3.17 Паралельне з'єднання мостів

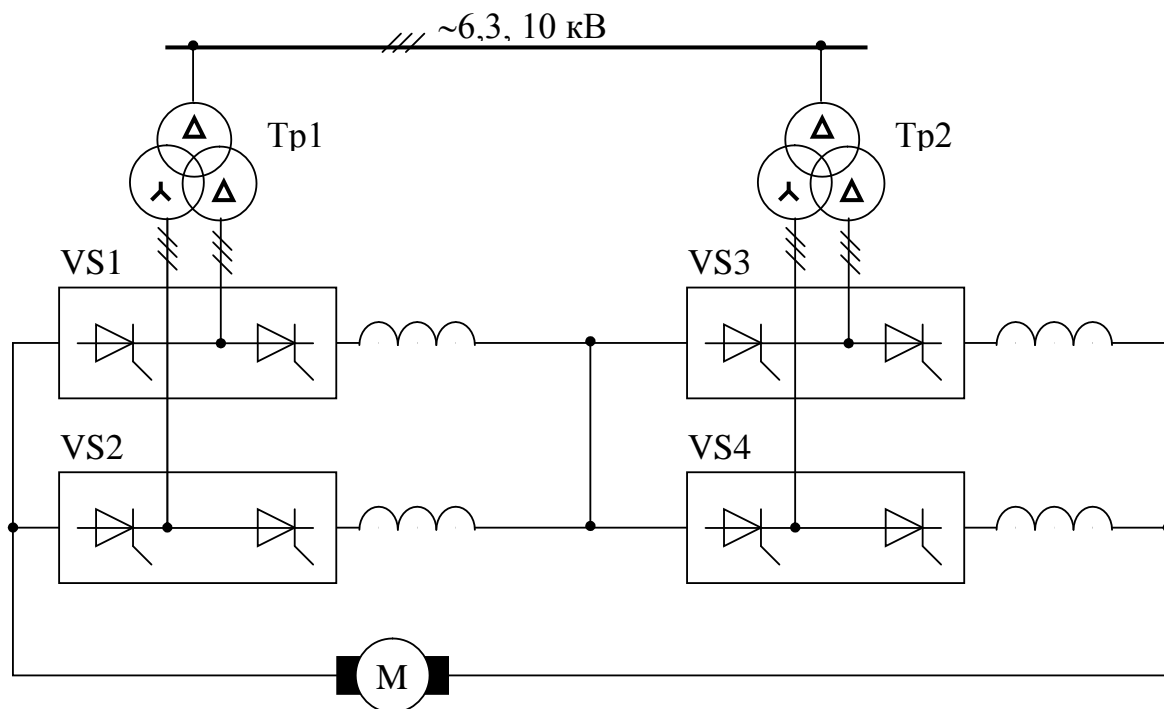


Рис. 3.18. Послідовно-паралельне з'єднання мостів

3.5. Регулювання струму у системі електропривода "генератор-двигун"

Відомо, що найбільш ефективно керування процесами електромеханічного перетворення енергії у двигуні постійного струму незалежного збудження забезпечується зміною напруги якоря двигуна. Раніше був розглянутий вентильний перетворювач як регульоване джерело напруги. Перспективність такої системи регулювання електроприводом не викликає сумніву. Однак у потужних і відповідальних установках гірничо-металургійного комплексу є досить поширеним і успішно використовується електропривод за системою "генератор – двигун" (Г-Д). Тому розглянемо особливості регулювання координат електропривода постійного струму у цій системі.

Генератор постійного струму є підсилювачем потужності, входним сигналом якого є напруга збудження генератора. Основним видом збуджувачів генератора є вентильний перетворювач, який забезпечує високу швидкодію та коефіцієнт підсилення потужності. Тому структурна схема послідовної корекції контуру регулювання струму двигуна в системі Г-Д має вигляд (рис.3.19).

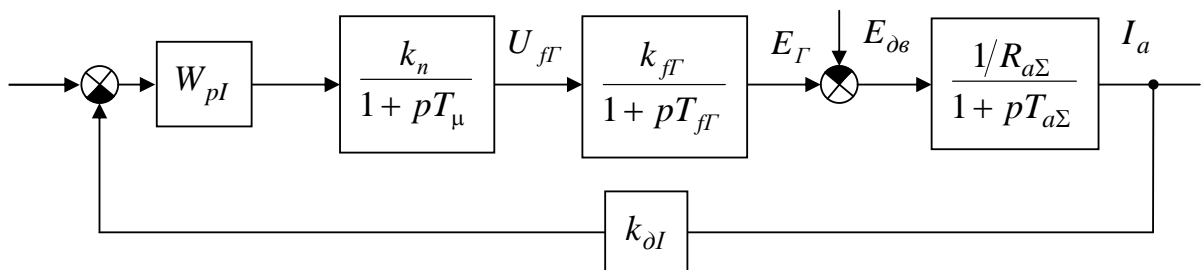


Рис. 3.19. Схема регулювання струму в системі Г-Д

Порівнюючи рис.3.19 з рис.3.1, бачимо, що з'явилася додаткова аперіодична ланка зі сталою часу обмотки збудження генератора $T_{fГ}$ і коефіцієнтом $k_{fГ} = E_{Г,н}/U_{fГ,н}$, де $E_{Г,н}$ – номінальна ЕРС генератора, $U_{fГ,н}$ – номінальна напруга збудження генератора. Таким чином, у контурі з'являється додаткова велика стала часу $T_{fГ}$, яка теж підлягає компенсації, як і стала часу якорного кола $T_{a\Sigma}$. У цьому випадку настроювання контуру на технічний оптимум забезпечується ПІД-регулятором струму.

Можна відмовитися від компенсації сталої часу $T_{a\Sigma}$, яка є меншою від $T_{fГ}$, поклавши $T'_\mu = T_\mu + T_{a\Sigma}$. При цьому матимемо ПІ-структуру регулятора струму, передаточна функція якого визначається формулою (3.1), де $T_2 = T_{fГ}$, а частота зрізу контуру $\omega_{cI} = 1/(2T'_\mu)$. Оскільки у T'_μ входить велика стала часу $T_{a\Sigma}$, частота зрізу ω_{cI} є досить низькою, що відповідає зниженню швидкодії контуру та зменшенню точності регулювання. Це по-

гіршення властивостей контуру регулювання струму тим більше, чим більше $T_{a\Sigma}$. Тому для компенсації впливу $T_{a\Sigma}$ на якість регулювання струму і моменту у системі Г-Д вводять підпорядкований контур регулювання ЕРС генератора E_{Γ} (рис.3.20).

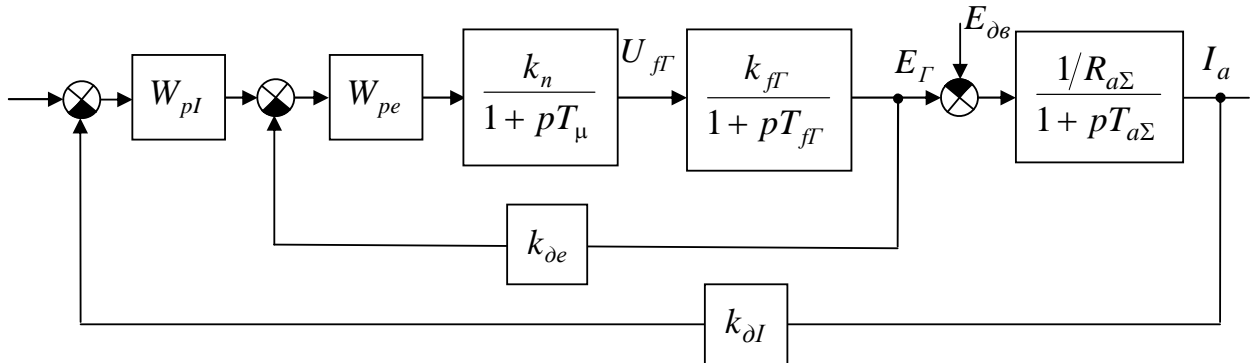


Рис. 3.20. Схема регулювання струму з підпорядкованим контуром ЕРС в системі Г-Д

У контурі регулювання ЕРС одна велика стала часу $T_{f\Gamma}$. Приймаємо структуру регулятора за формулою (3.1), де $T_2 = T_{f\Gamma}$, а T_1 визначається через частоту зрізу контуру

$$\omega_{ce} = \frac{k_n k_{f\Gamma} k_{\delta e}}{T_1}. \quad (3.39)$$

Для оптимізованого контуру $\omega_{ce} = 1/(2T_{\mu})$.

Синтез регулятора струму з передаточною функцією $W_{pl}(p)$ виконується за класичним алгоритмом синтезу системи підпорядкованого регулювання. Підпорядкований контур ЕРС згортається і апроксимується апериодичною ланкою

$$W_e^{зам}(p) \approx \frac{1/k_{\delta e}}{1+pT_{\mu}}. \quad (3.40)$$

Після згортання підпорядкованого контуру ЕРС структура системи регулювання відповідатиме структурній схемі (рис.3.1). Тому синтез $W_{pl}(p)$ відбуватиметься відповідно до формул (3.1) та (3.2).

Контрольні запитання

1. Вплив внутрішньої ЕРС двигуна на якість перехідних процесів. Принципи її компенсації.
2. Режим переривистого струму. Визначення структури регулятора струму.
3. Причини адаптації до режиму переривистого струму. Способи адаптації.
4. Регулятори струму з переключенням структур. Нарисувати схему адаптивного регулятора фірми АЕГ. Пояснити, як змінюється структура регулятора і яку передаточну функцію він має.
5. Регулятори струму з переключенням структур. Нарисувати схему адаптивного регулятора фірми "Сіменс". Пояснити, як змінюється структура регулятора і яку передаточну функцію він має.
6. Регулятори струму з переключенням структур. Нарисувати схему адаптивного регулятора фірми "Шкет". Пояснити, як змінюється структура регулятора і яку передаточну функцію він має.
7. Регулятори струму без переключення структур. Система регулювання струму з внутрішнім контуром напруги. Синтезувати регулятори.
8. Система регулювання струму з форсуючою ланкою у зворотному зв'язку за струмом. Синтезувати регулятори.
9. Система з двома жорсткими зв'язками по струму. Синтезувати регулятори.
10. Система із форсуючою ланкою у зворотному зв'язку за струмом. Синтезувати регулятор.
11. Система із гнучким та жорстким зворотним зв'язком по струму. Синтезувати регулятори.
12. Система регулювання струму з еталонною моделлю. Синтезувати регулятор.
13. Особливості регулювання струму в реверсивних електроприводах.
14. Особливості регулювання струму в багатомостових електроприводах.
15. Регулювання струму у системі електропривода "генератор-двигун". Синтез регуляторів.



ВЕНТИЛЬНІ ЕЛЕКТРОПРИВОДИ З РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ Й ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

4.1. Регулювання кутової швидкості

При розгляданні системи регулювання кутової швидкості замкнутий контур струму в зоні неперервного струму апроксимується аперіодичною ланкою

$$W_I^{зам}(p) \approx \frac{1/k_{\partial I}}{1 + pT_{\mu\omega}}, \quad (4.1)$$

де $T_{\mu\omega} = a \cdot T_{\mu} + T_{\phi}$ – мала некомпенсована стала часу контуру швидкості, T_{ϕ} – стала часу фільтра на виході датчика швидкості (тахогенератора).

Для зменшення швидкості наростання струму якоря у деяких випадках на виході регулятора швидкості встановлюють задатчик інтенсивності. При малих змінах вхідного сигналу задатчика він може бути апроксимований аперіодичною ланкою із сталою часу T_{zi} . Тоді

$$T_{\mu\omega} = a \cdot T_{\mu} + T_{\phi} + T_{zi}. \quad (4.2)$$

У залежності від значення коефіцієнта a змінюється якість перехідного процесу оптимізованого контуру (табл. 4.1)

$$a = \frac{M + 1}{M}, \quad (4.3)$$

де M – коефіцієнт коливальності.

Для добре демпфованих систем (запас за фазою 30...60°, за амплітудою 6...20 децибел) коефіцієнт коливальності змінюється у межах 1,1...1,5. У деяких випадках він досягає значень 2...2,5.

Структурна схема контуру кутової швидкості представлена на (рис.4.1). З рисунку видно, що в каналі регулювання швидкості існує велика електромеханічна стала часу $T_{M\Sigma}$, яку необхідно компенсувати, і що коефіцієнт підсилення прямого каналу залежить від значення потоку двигуна Φ .

Якісні показники перехідного процесу контуру швидкості

a	Перерегулювання σ , %	Частка часу першого досягнення ста- лого значення швидкості $t_n/T_{\mu\omega}$
1	16,3	2,43
2	4,3	4,7
4	0	13

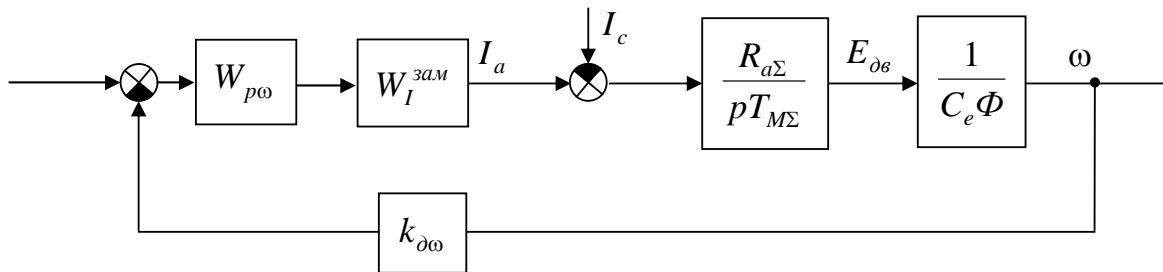


Рис. 4.1. Контур регулювання кутової швидкості

У відповідності до (рис. 4.1) передаточна функція розімкнутого контуру швидкості

$$W_{\omega}^{роз}(p) = W_{p\omega}(p) \cdot W_I^{зам}(p) \cdot \frac{R_{a\Sigma}}{p T_{M\Sigma}} \cdot \frac{k_{\delta\omega}}{C_e \Phi}, \quad (4.4)$$

де $T_{M\Sigma} = \frac{J_{\Sigma} R_{a\Sigma}}{C_e C_M \Phi^2}$, J_{Σ} – сумарний момент інерції механічної частини електропривода, яка обертається, C_e, C_M – конструктивні коефіцієнти двигуна, $k_{\delta\omega}$ – передаточний коефіцієнт зворотного зв'язку за кутовою швидкістю.

Як завжди, оптимізація контуру забезпечується регуляторами відповідної структури для досягнення бажаної частоти зрізу контуру $\omega_{c\omega}^{onm}$. Для технічного оптимуму

$$\omega_{c\omega}^{onm} = \frac{1}{a \cdot T_{\mu\omega}}, \quad (4.5)$$

Передаточна функція регулятора кутової швидкості залежить від вимог до електроприводу. Найбільш поширеними є наступні структури регуляторів:

пропорційний регулятор (П)

$$W_{p\omega}(p) = k_{p\omega}, \quad (4.6)$$

пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ)

$$W_{p\omega}(p) = \frac{pT_2 + 1}{pT_1}, \quad (4.7)$$

регулятор із змінним статизмом (ЗС)

$$W_{p\omega}(p) = \frac{k_{p\omega}(pT_2 + 1)}{pT_1 + 1}, \quad (T_1 > T_2). \quad (4.8)$$

Розглянемо кожний з варіантів з точки зору вибору параметрів регуляторів.

Пропорційний регулятор. Передаточна функція виду (4.6) використовується при відсутності високих вимог до електроприводу й відізняється простотою реалізації й налаштування. Згідно з формулами (4.1), (4.4) та (4.6) частота зрізу об'єкту регулювання дорівнює

$$\omega_{c\omega} = A \cdot k_{p\omega}, \quad (4.9)$$

де $A = \frac{R_{a\Sigma} k_{\partial\omega}}{k_{\partial I} C_e \Phi_n T_{M\Sigma, n}}$, $T_{M\Sigma, n}$ – електромеханічна стала часу при номінальному потоці двигуна Φ_n .

Порівнюючи формули (4.9) і (4.5), маємо

$$k_{p\omega} = \frac{1}{aT_{\mu\omega} A}. \quad (4.10)$$

Задача 4.1. Визначити параметри П-регулятора швидкості при налаштуванні контуру швидкості на заданий оптимум і відомих параметрах електропривода (див. задачі 3.1, 3.2).
Додаткові дані: $\omega_{\partial\epsilon\max} = 82,5$ рад/с.

Розв'язання задачі. Для вирішення задачі знаходимо деякі проміжні дані.

$$C_e \Phi_n = \frac{U_n - I_{aH} R_a}{\omega_n} = \frac{440 - 2460 \cdot 0,009}{33} = 12,66 \text{ Вс.}$$

$$k_{\partial\omega} = \frac{10}{\omega_{\partial\epsilon\max}} = \frac{10}{82,5} = 0,12 \text{ Вс.}$$

$$T_{M\Sigma} = \frac{J_{\Sigma} R_{a\Sigma}}{(C_e \Phi_n)^2} = \frac{1200 \cdot 33 \cdot 10^{-3}}{12,66^2} = 0,247 \text{ с.}$$

$$\text{Отримуємо } A = \frac{R_{a\Sigma} k_{\partial\omega}}{k_{\partial I} C_e \Phi_n T_{M\Sigma, n}} = \frac{33 \cdot 10^{-3} \cdot 0,12}{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 12,66 \cdot 0,247} = 0,79 \text{ с}^{-1}.$$

Мала стала часу контуру швидкості $T_{\mu\omega}$ окрім малої сталої часу внутрішнього контуру струму $T_{\mu I}$ включає, також, сталу часу фільтра на виході давача швидкості і суму малих сталих часу інших елементів контура швидкості (датчиків, підсилювачів). Загалом сума цих величин прийемо 17 мс. Тому

$$T_{\mu\omega} = T_{\mu I} + 0,017 = 0,004 + 0,017 = 0,021 \text{ с.}$$

Хороші динамічні властивості електропривод може мати при коефіцієнті коливальності $M = 1,5$.

З формули (4.3) отримуємо $a = 1,67$. Ці умови відрізняються від технічного оптимуму у бік підвищення перерегулюванні і коливальності процесу зміни швидкості, але при цьому збільшується швидкодія контуру.

З формули (4.10) маємо

$$k_{p\omega} = \frac{1}{1,67 \cdot 0,021 \cdot 0,79} = 36,09.$$

Коефіцієнт підсилення прямого каналу регулювання кутової швидкості не повинен залежати від змін параметрів електропривода. Якщо регулювання швидкості виконується у діапазоні від нуля до номінальної, то при забезпеченні температурної корекції параметру $R_{a\Sigma}$ (або нехтуванні зміною його значення) настроювання контуру виконується на номінальний потік двигуна $\Phi = \Phi_n$. При цьому коефіцієнт підсилення прямого каналу регулювання кутової швидкості буде постійним у прийнятому діапазоні регулювання швидкості.

У другій зоні регулювання (вище номінальної) зміна кутової швидкості виконується за рахунок глибокого регулювання потоку двигуна. Тому коефіцієнт підсилення прямого каналу регулювання кутової швидкості буде відповідно зменшуватися, зменшуючи швидкодію контуру (див. формулу (4.4)). Для забезпечення інваріантності контуру до зменшення потоку необхідно неперервне корегування коефіцієнта підсилення прямого каналу регулювання шляхом пропорційного збільшення значення коефіцієнта підсилення $k_{p\omega}$. Найбільш просто стабілізація передаточного коефіцієнту розімкнутого контуру регулювання кутової швидкості виконується шляхом ділення вихідного сигналу регулятора швидкості на сигнал, пропорційний потоку двигуна (рис. 4.2).

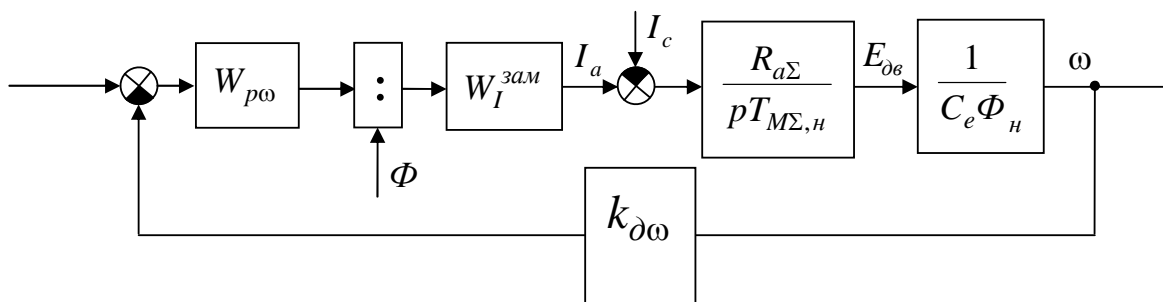


Рис. 4.2. Контур регулювання кутової швидкості з корекцією коефіцієнта підсилення каналу регулювання

Пропорційно-інтегральний регулятор. ІІ-регулятор використовується при необхідності мати нульову статичну похибку за швидкістю при прикладенні навантаження. Якщо у формулу (4.4) підставити формулу (4.7), то можна отримати

$$W_{\omega}^{poz}(p) = \frac{A \cdot (1 + pT_2)}{T_1 \cdot p^2(1 + pT_{\mu\omega})}, \quad (4.11)$$

Частота зрізу передаточної функції (4.11)

$$\omega_{c\omega} = \frac{A \cdot T_2}{T_1}. \quad (4.12)$$

Частота зрізу оптимізованого контуру кутової швидкості $\omega_{c\omega}^{onm}$ вибирається за критерієм мінімальної стійкості Бессекерського, тобто

$$\omega_{c\omega}^{onm} = \frac{M}{M+1} \cdot \frac{1}{T_{\mu\omega}}. \quad (4.13)$$

Вибір коефіцієнта коливальності M визначає якість перехідного процесу у контурі швидкості при стрибку навантаження. Через коефіцієнт M отримується значення сталої часу T_2

$$T_2 = \frac{M+1}{M-1} \cdot T_{\mu\omega}. \quad (4.14)$$

Порівнюючи формули (4.12) і (4.13) з урахуванням формули (4.14), отримують параметр регулятора T_1

$$T_1 = A \cdot \frac{(M+1)^2}{M \cdot (M-1)} \cdot T_{\mu\omega}^2. \quad (4.15)$$

Задача 4.2. Визначити параметри ІІ-регулятора швидкості при настроюванні контуру швидкості на заданий оптимум і відомих параметрах електропривода (див. задачу 4.1).

Розв'язання задачі. Визначимо бажану частоту зрізу контуру швидкості.

З формули (4.13) маємо

$$\omega_{c\omega}^{onm} = \frac{1,5}{1,5+1} \cdot \frac{1}{0,021} = 28,57 \text{ с}^{-1}.$$

Параметри ІІ-регулятора швидкості отримуємо із формул (4.14) і (4.15)

$$T_2 = \frac{1,5+1}{1,5-1} \cdot 0,021 = 0,105 \text{ с}, \quad T_1 = 0,79 \cdot \frac{(1,5+1)^2}{1,5 \cdot (1,5-1)} \cdot 0,021^2 = 0,0029 \text{ с}.$$

Регулятор швидкості з ІІ-структурою забезпечує високу швидкодію при навантажувальних збудженнях, але при цьому система має підвищене

перерегулювання при впливі по каналу завдання. Тому, для зменшення перерегулювання сигнал завдання подається через фільтр із сталою часу, яку, за звичай, приймають рівною T_2 . Замість фільтра на вході контуру швидкості може бути використаний задатчик інтенсивності на вході контуру регулювання струму з обмеженням швидкості зростання струму. Його стала часу T_{zi} розраховується через заданий динамічний струм $I_{дин}$, та задану швидкість зростання струму (di/dt)

$$T_{zi} = \frac{I_{дин}}{(di/dt)}. \quad (4.16)$$

У зоні переривистого струму характеристики контуру регулювання швидкості змінюються за рахунок зміни динамічних характеристик контуру струму. З формули (3.6) видно, що частота зрізу контуру струму в режимі переривистого струму суттєво зменшується, що призводить до збільшення некомпенсованої сталої часу контуру швидкості $T_{\mu\omega}$, тобто затягуванні перехідного процесу. Як видно з формули (4.15), в режимі неперервного струму виконується умова $T_{\mu\omega} < T_1$. Збільшення $T_{\mu\omega}$ в режимі переривистого струму може порушити цю умову і призвести до втрати стійкості системи. Особливо важливо враховувати цей факт при настроюванні електроприводів з великою зоною переривистих струмів, наприклад, в електроприводах листопрокатних станів.

Для зменшення впливу зони переривистих струмів на якість регулювання кутової швидкості використовують різні види адаптації контуру струму (див. розділ 3). Різні методи адаптації контуру струму збільшують частоту зрізу контуру і зменшують, таким чином, вірогідність переходу електропривода у нестійкий режим. Найбільш радикальне рішення – перехід на П-регулятор швидкості при малих струмах. Тобто пропонується адаптивний регулятор швидкості.

Регулятор із змінним статизмом. У деяких випадках виникають умови, коли відсутність статичної похибки за швидкістю небажана. Наприклад, пружні коливання у механічній частині електропривода демпфуються за рахунок кінцевої жорсткості механічної характеристики двигуна, скоректованої системою регулювання швидкості. При цьому використання П-регулятора забезпечує статизм на рівні, який визначається технічним оптимумом

$$\Delta\omega = \frac{k_{\partial I} \cdot I_c}{k_{\partial\omega} \cdot k_{p\omega}}. \quad (4.17)$$

Однак, значення статизму за формулою (4.17) може бути занадто великим, і його слід зменшити. Зменшення $\Delta\omega$ тільки за рахунок збільшення коефіцієнта підсилення регулятора швидкості $k_{p\omega}$ обмежується зростан-

ням впливу завад. Тому для регулювання статизму використовують регулятор кутової швидкості виду (4.8).

Підставляючи формулу (4.8) у формулу (4.4), отримуємо передаточну функцію розімкнутого контуру швидкості виду

$$W_{\omega}^{poz}(p) = \frac{k_{p\omega} \cdot A \cdot (pT_2 + 1)}{p(pT_1 + 1)(1 + pT_{\mu\omega})}, \quad (4.18)$$

Частота зрізу такої системи

$$\omega_{c\omega} = \frac{A \cdot k_{p\omega} \cdot T_2}{T_1} \quad (4.19)$$

залежить від співвідношення $k_{p\omega} \cdot T_2 / T_1$. Якщо прийняти $k'_{p\omega} \cdot T_2 / T_1$ таким, щоб частота зрізу системи за формулою (4.19) не змінилася відносно частоти зрізу за формулою (4.9), то тоді співвідношення $k'_{p\omega} \cdot T_2 / T_1$ для ЗС-регулятора буде визначатися через коефіцієнт підсилення П-регулятора $k_{p\omega}$ як

$$k_{p\omega} = k'_{p\omega} \cdot \frac{T_2}{T_1}. \quad (4.20)$$

Таким чином, забезпечивши сталість швидкодії контуру швидкості за рахунок виконання співвідношення (4.20), можна підібрати такі параметри ЗС-регулятора T_1 , T_2 , $k'_{p\omega}$, які забезпечують певний статизм характеристик електропривода у діапазоні від значення (4.17) до будь якого

$$\Delta\omega = \frac{k_{\partial I} \cdot I_c}{k_{\partial\omega} \cdot k'_{p\omega}} \cdot \frac{T_1}{T_2}. \quad (4.21)$$

Задача 4.3. Визначити параметри ЗС-регулятора швидкості при настроюванні контуру швидкості на заданий статизм. Вихідні дані електропривода отримати із задачі 4.2.

Розв'язання задачі. Визначимо статизм регулювання швидкості при настроюванні контуру на технічний оптимум (див. формулу 4.17) при номінальному навантаженні. Отримуємо

$$\Delta\omega = \frac{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2460}{0,12 \cdot 36,09} = 0,9 \text{ с}^{-1}.$$

$$\text{Відносно номінальної швидкості } \Delta\omega^* = \frac{\Delta\omega}{\omega_n} \cdot 100 = \frac{0,9}{33} \cdot 100 = 2,7\%.$$

Такий статизм забезпечується П-регулятором швидкості з $k_{p\omega} = 36,09$.

Якщо прийняти $T_1 = 0,0029 \text{ с}$ і $T_2 = 0,105 \text{ с}$, що отримані для П-регулятора у задачі 4.2, то маємо для ЗС-регулятора $k_{p\omega} = 36,09 \cdot \frac{0,105}{0,0029} = 130,6$.

4.2. Регулювання ЕРС або напруги

Замість зворотного зв'язку за швидкістю може використовуватися зворотний зв'язок за ЕРС або напруги двигуна. Такий вид зв'язку дозволяє уникнути використання тахогенератора, спростити систему регулювання. Але, при цьому статичні і динамічні характеристики системи будуть значно гірші.

Регулювання ЕРС. Згідно з рівнянням (3.18) сигнал, пропорційний ЕРС двигуна, можна отримати, пропускаючи сигнал з датчика напруги двигуна через фільтр із сталою часу T_a і виконуючи алгебраїчне сумування вихідного сигналу фільтра із вихідним сигналом датчика струму

$$\frac{E_{дв}(p)}{1 + pT_a} = \frac{U_{дв}(p)}{1 + pT_a} - I_a(p)R_a. \quad (4.22)$$

Таким чином, зворотний зв'язок з ЕРС має запізнення, пов'язане із електромагнітною сталою часу двигуна T_a (рис. 4.3). Саме це призводить до того, що динамічні характеристики системи регулювання ЕРС є значно гіршими від динамічних характеристик системи регулювання швидкості. Через те, що стала часу T_a велика, фактичне перерегулювання ЕРС є значно більшим ніж розрахункове.

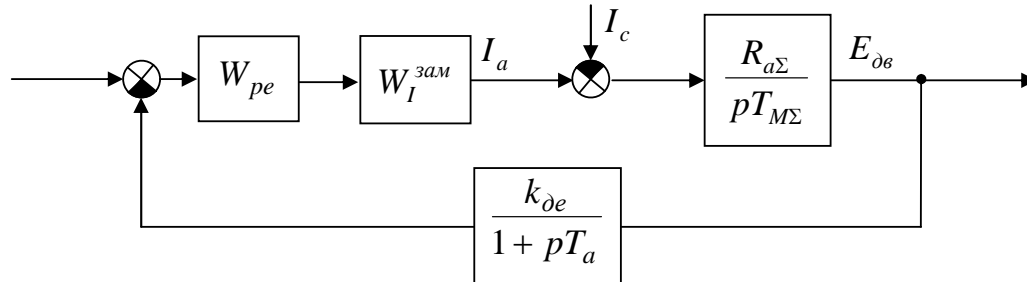


Рис. 4.3. Контур регулювання ЕРС двигуна

При розрахунку параметрів регулятора ЕРС сталої часу фільтра датчика ЕРС T_a приводять до некомпенсованої сталої часу $T_{\mu e}$ шляхом заміни сталої часу фільтра T_ϕ датчика швидкості (див. формулу (4.1)). Тому

$$W_I^{зам}(p) \approx \frac{1/k_{\partial I}}{1 + pT_{\mu e}}, \quad (4.23)$$

де $T_{\mu e} = a \cdot T_\mu + T_a$ – мала некомпенсована стала часу контуру ЕРС.

Через невисокі динамічні властивості системи регулювання ЕРС немає сенсу використовувати ПІ та ЗС-регулятори ЕРС. Тому, частота зрізу

системи визначається для П-регулятора ЕРС з коефіцієнтом підсилення k_{pe}

$$\omega_{ce} = B \cdot k_{pe}, \quad (4.24)$$

де $B = \frac{R_{a\Sigma} k_{\partial e}}{k_{\partial I} T_{M\Sigma, n}}$, $k_{\partial e}$ – коефіцієнт передачі датчика ЕРС.

Настроювання виконується на технічний оптимум, тому

$$k_{pe} = \frac{1}{a T_{\mu e} B}. \quad (4.25)$$

Регулювання напруги. Перевагою системи регулювання напруги двигуна у порівнянні із системою регулювання ЕРС є простота заміру напруги. Однак система із зворотним зв'язком за напругою структурно більш складна.

Структурно зворотний зв'язок за напругою двигуна може бути отриманий з формули (4.22). Тоді структурна схема системи керування матиме вигляд (рис.4.4). На схемі (рис.4.4) коефіцієнт α визначає степінь компенсації падіння напруги на опорі якоря двигуна (при $\alpha = 0$ діє виключно зворотний зв'язок за ЕРС), а $k_{\partial U}$ – коефіцієнт передачі датчика напруги (ЕРС).

Приведемо сталу часу T_a зворотного зв'язку до некомпенсованої сталої часу контуру напруги $T_{\mu U}$. Тоді

$$W_I^{зам}(p) \approx \frac{1/k_{\partial I}}{1 + p T_{\mu U}}, \quad (4.26)$$

де $T_{\mu U} = a \cdot T_{\mu} + T_a$.

Виконаємо перетворення схеми (рис.4.4) шляхом переносу зворотного зв'язку за струмом на вхід замкнутого контуру струму та з використанням П-регулятора напруги, що має коефіцієнт підсилення k_{pU} . Отримаємо схему (рис. 4.5).

З (рис.4.5) маємо передаточну функцію розімкненого контуру напруги

$$W_U^{poz}(p) = k_{pU} \cdot \frac{1/k'_{\partial I}}{1 + p T'_{\mu U}} \cdot \frac{R_{a\Sigma} k_{\partial U}}{p T_{M\Sigma}}, \quad (4.27)$$

де $k'_{\partial I} = k_{\partial I} \cdot k_1$, $T'_{\mu U} = \frac{T_{\mu U}}{k_1}$, $k_1 = 1 + \frac{\alpha R_{a\Sigma} k_{pU} k_{\partial U}}{k_{\partial I}}$.

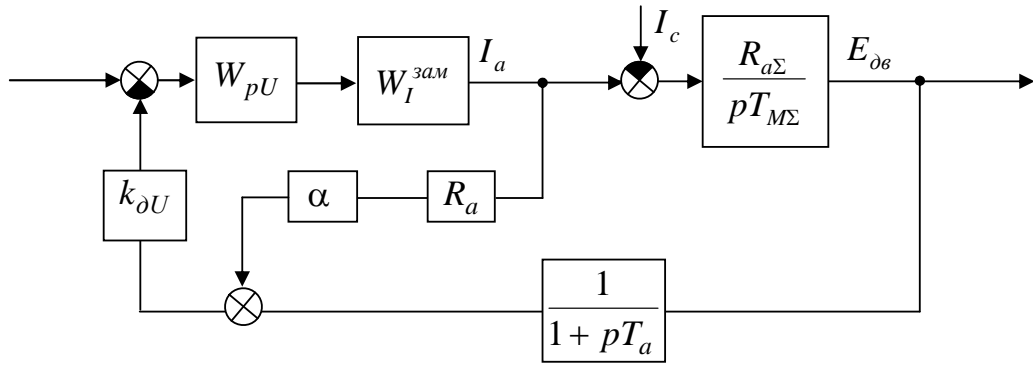


Рис. 4.4. Система регулювання напруги двигуна

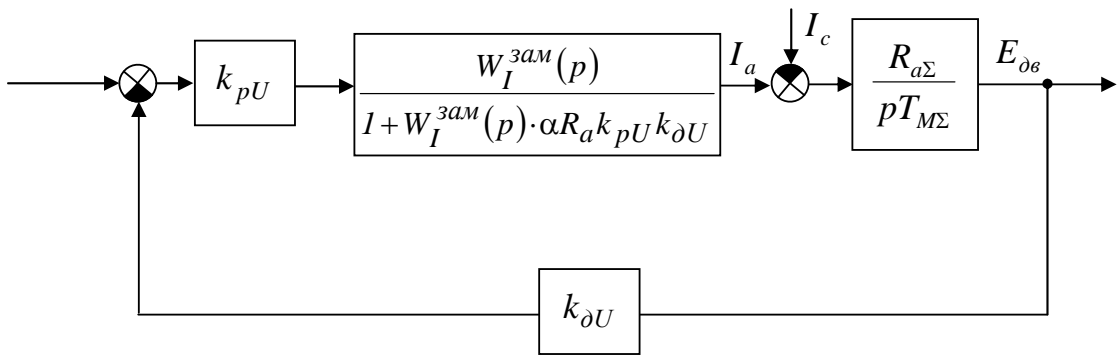


Рис. 4.5. Перетворена система регулювання напруги двигуна

З формули (4.27) видно, що при неповній компенсації падіння напруги у якорі двигуна параметри регулятора струму неможливо вибрати незалежно від параметрів регулятора напруги.

Враховуючи, що $T_a \gg T_\mu$, вважаємо $T'_{\mu U}$ незмінною при зміні k_{pU} . Тоді бажана частота зрізу контуру напруги визначається як

$$\omega_{cU}^{om} = \frac{1}{a \cdot T_{\mu U}}. \quad (4.28)$$

За формулою (4.27) частота зрізу розімкнутого контуру напруги знаходиться як

$$\omega_{cU} = \frac{k_{pU} R_{a\Sigma} k_{\partial U}}{k_{\partial I} T_{M\Sigma} \left(1 + \frac{\alpha R_a k_{pU} k_{\partial U}}{k_{\partial I}} \right)}. \quad (4.29)$$

З формули (4.29) маємо

$$k_{pU} = \frac{\omega_{cU} k_{\partial I} T_{M\Sigma}}{(R_{a\Sigma} - \omega_{cU} T_{M\Sigma} R_a \alpha) k_{\partial U}}. \quad (4.30)$$

Підставляючи у формулу (4.30) значення $\omega_{cU} = \omega_{cU}^{omm}$, знаходимо значення коефіцієнта підсилення регулятора напруги k_{pU} .

Задача 4.4. Визначити параметри П-регулятора напруги при настроюванні контуру напруги на заданий оптимум. Вихідні дані електропривода отримати із задач 3.1, 4.1, 4.2.

Розв'язання задачі. Знаходимо некомпенсовану сталу часу контуру напруги

$$T_{\mu U} = T_{\mu I} + T_{a\Sigma} = 0,004 + 0,028 = 0,032 \text{ с.}$$

Коефіцієнт передачі датчика напруги

$$k_{\partial U} = \frac{10}{440} = 0,0227.$$

З формули (4.29) отримуємо при $a = 2$

$$\omega_{cU} = \frac{1}{2 \cdot 0,032} = 15,6 \text{ с}^{-1}.$$

Порівнюючи $\omega_{cU} = 15,6 \text{ с}^{-1}$ із $\omega_{c\omega} = 28,57 \text{ с}^{-1}$ (див. задачу 4.2), бачимо, що швидкодія контуру напруги практично у 2 рази менша за швидкодію контуру швидкості.

При відомих $T_{M\Sigma} = 0,247 \text{ с}$, $R_a = 0,009 \text{ Ом}$, $R_{a\Sigma} = 0,033 \text{ Ом}$, $k_{\partial I} = 0,0016 \text{ В/А}$, задаючись коефіцієнтом $\alpha = 0,5$, маємо

$$k_{pU} = \frac{15,6 \cdot 0,0016 \cdot 0,247}{(0,033 - 15,6 \cdot 0,247 \cdot 0,009 \cdot 0,5) \cdot 0,0227} = 17,3.$$

$$k_1 = 1 + \frac{0,5 \cdot 0,009 \cdot 17,3 \cdot 0,0227}{0,0016} = 1,0018.$$

Через те, що стала часу $T'_{\mu U}$ зменшилася у k_1 разів, у контурі струму слід зменшити сталу часу T_1 ПІ-регулятора струму (див. формулу (3.1)) теж у k_1 разів.

Слід зазначити, що при такому налагодженні динамічні характеристики систем із зворотним зв'язком за ЕРС та напругою будуть однаковими.

Наступний варіант розрахунку параметру k_{pU} пропонується через передаточну функцію замкнутої системи регулювання напруги. Структурну схему (рис.4.5) можна привести до структури з одиничним зворотним зв'язком. Тоді передаточна функція замкнутої системи регулювання напруги буде мати вигляд

$$W_U^{зам}(p) = \frac{\omega_c^2}{p^2 + (2\xi\omega_c)p + \omega_c^2} \quad (4.31)$$

де $\omega_c^2 = \frac{k_{pU} R_{a\Sigma} k_{\partial U}}{T_{\mu U} T_{M\Sigma} k_{\partial I}}$ – частота власних коливань системи, $2\xi\omega_c = \frac{k_1}{T_{\mu U}}$,

ξ – коефіцієнт демпфування.

За умов технічного оптимуму $\xi = \sqrt{a}/2$, $\omega_c^2 = 1/(aT_{\mu U}^2)$.

Як видно з формули (4.31), частота власних коливань системи ω_c не залежить від коефіцієнту α . Тому параметр k_{pU} , знайдений через ω_c , відповідає налагодженню регулятора ЕРС за формулою (4.25), тобто при повній відсутності компенсації падіння напруги у якорі двигуна ($\alpha = 0$).

$$k_{pU} = \frac{T_{M\Sigma, H} k_{\partial I}}{a T_{\mu U} R_{a\Sigma} k_{\partial U}}. \quad (4.32)$$

Коефіцієнт α впливає на коефіцієнт демпфування системи ξ , тому k_{pU} слід визначати через цей коефіцієнт. Спочатку знайдемо k_1

$$k_1 = 2\xi\omega_c T_{\mu U}. \quad (4.33)$$

З формул (4.27) і (4.33) маємо

$$k_{pU} = \frac{(2\xi\omega_c T_{\mu U} - 1)k_{\partial I}}{\alpha R_a k_{\partial U}}. \quad (4.34)$$

Формула (4.34) дозволяє розрахувати коефіцієнт підсилення регулятора напруги при заданому коефіцієнті компенсації падіння напруги на якорі двигуна α і заданих параметрах якості перехідного процесу ξ , ω_c . З цієї формули видно, що при $\alpha \neq 0$ досягти показників перехідного процесу, що відповідає технічного оптимуму, неможливо.

Структурно зворотний зв'язок за напругою може бути умовно замінений зворотним зв'язком за ЕРС за допомогою формули, що впливає з формули (4.22) та залежності для $E_{\partial\delta}(p)$

$$E_{\partial\delta}(p) = I_a(p) R_{a\Sigma} / (p T_{M\Sigma}) \quad (4.35)$$

$$U_{\partial\delta}(p) = (p^2 T_{M\Sigma} T_a + p T_{M\Sigma} + 1) \cdot E_{\partial\delta}(p). \quad (4.36)$$

На (рис.4.6) представлена структурна схема з урахуванням формули (4.36).

Схема у вигляді (рис.4.6) непрацездатна через наявність ланки $p^2 T_{M\Sigma} T_a + p T_{M\Sigma} + 1$ у колі зворотного зв'язку. Тому необхідна компенсація цієї ланки. Компенсацію можна виконати введенням у коло зворотного зв'язку ланки корегування з передаточними функціями $1/(1 + p T_{\phi 1})$ і $1/(1 + p T_{\phi 2})$ (рис.4.7).

Для повної компенсації дії ланки $p^2 T_{M\Sigma} T_a + p T_{M\Sigma} + 1$ необхідно виконати умову

$$(1 + p T_{\phi 1})(1 + p T_{\phi 2}) = p^2 T_{M\Sigma} T_a + p T_{M\Sigma} + 1. \quad (4.37)$$

Рівняння (4.37) розпадається на характеристичні рівняння

$$p^2 T_{M\Sigma} T_a + p T_{M\Sigma} + 1 = 0, \quad (4.38)$$

$$(1 + p T_{\phi 1})(1 + p T_{\phi 2}) = 0 \quad (4.39)$$

Рівняння (4.37) виконується, якщо корені характеристичних рівнянь (4.38) і (4.39) однакові.

Для простоти приймаємо $T_{\phi 1} = T_{\phi 2} = T_{\phi}$. Тоді рівняння (4.39) має тільки дійсні корені. У рівнянні (4.38) корені можуть бути як дійсними, так і комплексними.

При умові $T_{M\Sigma} < 4T_a$ корені рівняння (4.38) комплексні. Рівняння (4.37) приблизно виконується, якщо

$$T_{\phi} = \sqrt{T_{M\Sigma} T_a}, \quad (4.40)$$

або

$$T_{\phi} = T_{M\Sigma} / 2. \quad (4.41)$$

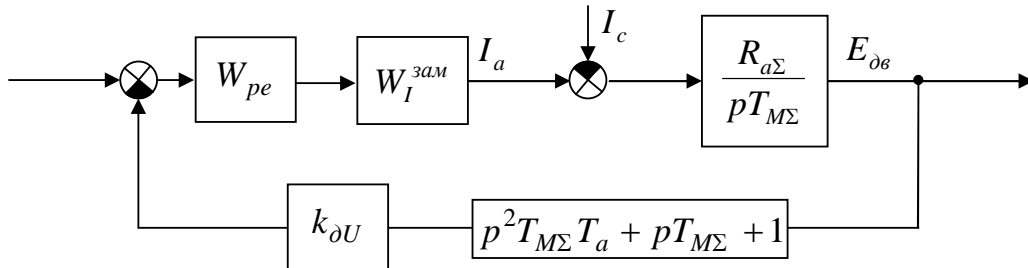


Рис. 4.6. Контур регулювання напруги двигуна

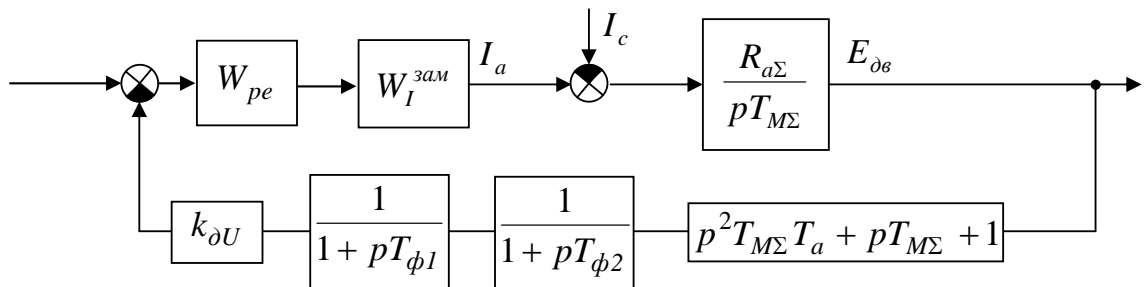


Рис. 4.7. Контур регулювання напруги двигуна
з ланками корегування

При умові $T_{M\Sigma} > 4T_a$ корені рівняння (4.38) дійсні. Точне виконання рівняння (4.37) можливе з коренями

$$T_{\phi 1,2} = \frac{T_{M\Sigma}}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4T_a}{T_{M\Sigma}}} \right). \quad (4.42)$$

При повній компенсації ланки $p^2 T_{M\Sigma} T_a + p T_{M\Sigma} + 1$ структурна схема (рис.4.7) перетворюється на схему (рис.4.5) при $\alpha = 0$. Тому коефіцієнт підсилення регулятора напруги k_{pU} знайдеться за формулою (4.33).

4.3. Керування полем двигуна

Система керування магнітним потоком двигуна в електроприводі з двохзонним регулюванням швидкості є залежною і може виконуватися *двох- або одноконтурною*.

Двоконтурне регулювання потоку. При двоконтурному регулюванні потоку існує зовнішній контур ЕРС й підпорядкований йому контур регулювання потоку (рис.4.8).

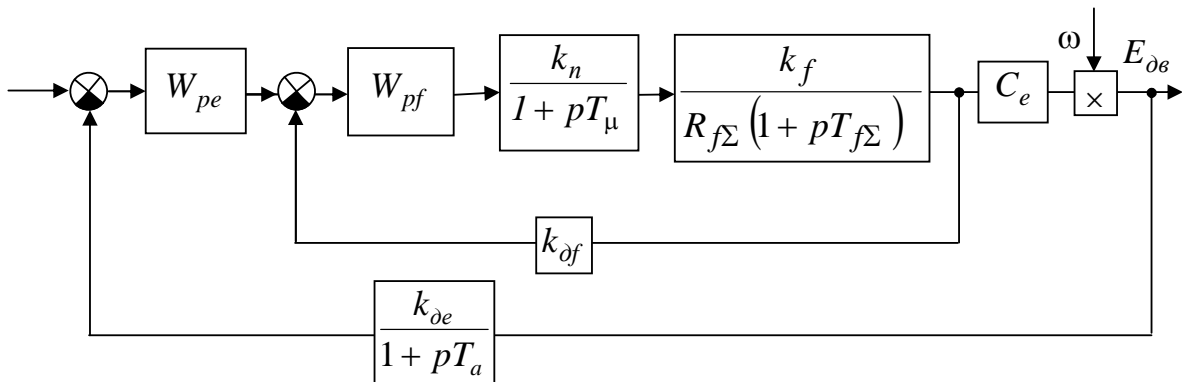


Рис. 4.8. Двоконтурна система регулювання потоку

Співвідношенню між напругою вентильного перетворювача U_f і потоком Φ , відповідає рівняння

$$U_f (1 + pT_{ff}) = I_f R_{f\Sigma} (1 + pT_{f\Sigma}), \quad (4.43)$$

де T_{ff} – стала часу вихрових струмів, $T_{f\Sigma} = T_f + T_{ff}$ – сумарна стала часу обмотки збудження двигуна, T_f – стала часу збудження обмотки двигуна, $R_{f\Sigma}$ – сумарний активний опір обмотки збудження.

Магнітний потік може бути виміряний за допомогою датчиків Холла. Однак, у більшості випадків він знаходиться через струм збудження

$$\Phi = I_f \cdot \frac{k_f}{1 + pT_{ff}}, \quad (4.44)$$

де k_f – коефіцієнт пропорційності між струмом збудження I_f і потоком на лінійному відрізку кривої намагнічування.

У двоконтурній системі регулювання потоку можуть використовуватися наступні структури регулятора потоку:

пропорційний регулятор

$$W_{pf}(p) = k_{pf}, \quad (4.45)$$

пропорційно-інтегральний

$$W_{pf}(p) = \frac{1 + pT_2}{pT_1}. \quad (4.46)$$

При структурі регулятора (4.45) передаточна функція розімкненого контуру потоку приймає вигляд

$$W_f(p) = k_{pf} \cdot \frac{k_n k_f k_{df}}{R_{f\Sigma} (1 + pT_\mu) (1 + pT_{f\Sigma})}. \quad (4.47)$$

Частота зрізу контуру

$$\omega_{cf} = k_{pf} \cdot A, \quad (4.48)$$

де $A = \frac{k_n k_f k_{df}}{R_{f\Sigma} T_{f\Sigma}}.$

Відпрацювання завдання на потік повинно виконуватися без перерегулювання, тому оптимізована частота зрізу дорівнюватиме

$$\omega_{cf}^{opt} \leq \frac{1}{4T_\mu}, \quad (4.49)$$

На практиці прагнуть виконати умову (4.49) із запасом для роботи датчика потоку на лінійній ланці кривої намагнічування.

При структурі регулятора (4.46) передаточна функція розімкненого контуру потоку приймає вигляд

$$W_f(p) = \frac{(1 + pT_2)}{pT_1} \cdot \frac{k_n k_f k_{df} / R_{f\Sigma}}{(1 + pT_\mu) (1 + pT_{f\Sigma})}. \quad (4.50)$$

Частота зрізу контуру у цьому випадку

$$\omega_{cf} = A \cdot \frac{T_2}{T_1}, \quad (4.51)$$

Якщо прийняти $T_2 = T_{f\Sigma}$ для компенсації великої сталої часу у контурі, то інший невідомий параметр регулятора за умови (4.49) визначиться як

$$T_1 = \frac{A \cdot T_{f\Sigma}}{\omega_{cf}}. \quad (4.52)$$

Через суттєву нелінійність, якою є крива намагнічування двигуна, коефіцієнт k_f залежить від значення потоку Φ двигуна. Тому настроювання регулятора слід виконувати при мінімальному значенні потоку, тому що при цьому значенні потоку коефіцієнт k_f і частота зрізу є максимальними (початкова ланка кривої намагнічування). Збільшення потоку призводить до паралельного зміщення ЛАЧХ контуру вліво по вісі абсцис і збільшенні запасу за амплітудою при відповідному зменшенні швидкодії контуру.

Задача 4.5. Визначити параметри ПІ-регулятора потоку при настроюванні контуру потоку на заданий оптимум.

Вихідні дані обмотки збудження двигуна:

сумарний активний опір обмотки збудження $R_{f\Sigma} = 3,72$ Ом,

стала часу збудження обмотки двигуна $T_f = 1,87$ с,

номінальний струм збудження $I_{fn} = 40$ А,

номінальний потік $\Phi_n = 0,142$ Вб.

Вентильний перетворювач обмотки збудження : $E_{d0} = 500$ В.

Коефіцієнт передачі датчика потоку $k_{df} = 66,7$ В/Вб.

Коефіцієнт пропорційності між струмом збудження і потоком на лінійному відрізку кривої намагнічування $k_f = 1,33$.

Розв'язання задачі. Визначаємо сумарну сталу часу обмотки збудження двигуна, приймаючи $T_{ff} = 0,1T_f$,

$$T_{f\Sigma} = T_f + T_{ff} = 1,87 + 0,1 \cdot 1,87 = 2,057 \text{ с.}$$

Отримуємо коефіцієнт підсилювання збуджувача

$$k_n = \frac{E_{d0}}{10} = 50.$$

Вважаємо, що потік регулюється вниз до $0,5 \Phi_n$. Тому $k'_f = 0,5 k_f = 0,65$.

$$\text{Знаходимо } A = \frac{k_n k'_f k_{df}}{R_{f\Sigma} T_{f\Sigma}} = \frac{50 \cdot 0,65 \cdot 66,7}{3,72 \cdot 2,057} = 289,83.$$

$$\text{Задаємо } \omega_{cf} = \frac{1}{4T_\mu} = \frac{1}{4 \cdot 0,004} = 62,5 \text{ с}^{-1}.$$

З формули (4.52) знаходимо

$$T_1 = \frac{A \cdot T_{f\Sigma}}{\omega_{cf}} = \frac{289,83 \cdot 2,057}{62,5} = 2,25 \text{ с.}$$

Перша зона регулювання кутової швидкості забезпечується шляхом стабілізації потоку на рівні номінального. При цьому регулятор ЕРС знаходиться у насиченні, а контур ЕРС розімкнутий. Тому ЕРС двигуна зростає лінійно в залежності від швидкості.

У другій зоні регулятор ЕРС виходить із насичення, і контур ЕРС замикається. Потік двигуна починає змінюватися в залежності від вихідного сигналу регулятора ЕРС. Як видно з (рис.4.8), контур ЕРС має нелінійність у вигляді блока множення на кутову швидкість двигуна. Тому для стабілізації динамічних характеристик у другій зоні регулювання вихід регулятора ЕРС необхідно ділити на сигнал, пропорційний кутовій швидкості двигуна, або помножити на сигнал, пропорційний потоку (рис. 4.9). У цьому разі коефіцієнт підсилення контуру ЕРС буде стабілізований.

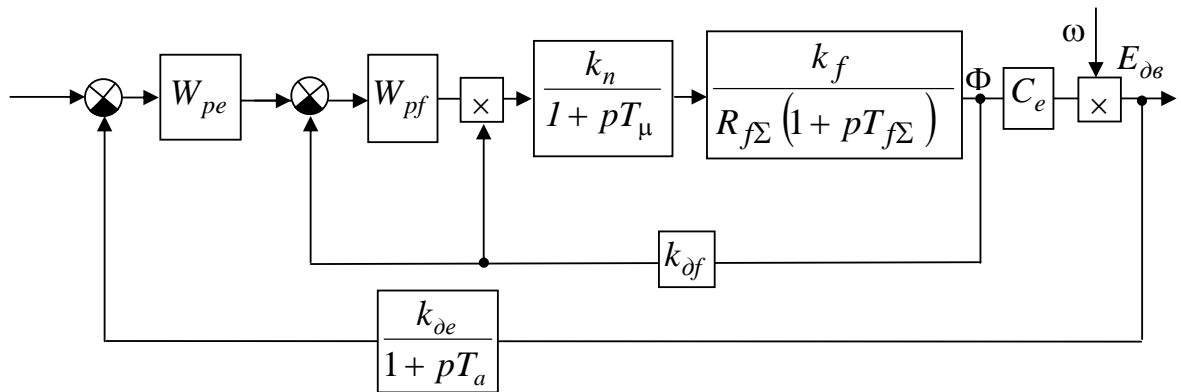


Рис. 4.9. Двоконтурна система регулювання потоку із корекцією сигналу регулятора ЕРС

У якості регулятора ЕРС приймається:
інтегральний регулятор (I)

$$W_{pe}(p) = \frac{1}{pT_1}, \quad (4.53)$$

пропорційно-інтегральний

$$W_{pf}(p) = \frac{1 + pT_2}{pT_1}. \quad (4.54)$$

Згортаючи контур потоку, отримуємо приблизну апроксимацію виду

$$W_f^{зам}(p) \approx \frac{1/k_{of}}{1 + pT_{\mu e}}, \quad (4.55)$$

де $T_{\mu e} \geq 8T_{\mu}$.

Як було зазначено раніше, датчик ЕРС має інерційність, пов'язану із сталою часу якоря двигуна T_a .

Приведемо сталу часу T_a зворотного зв'язку до некомпенсованої сталої часу контуру ЕРС $T_{\mu e}$. Тоді у контурі ЕРС будуть формально відсутні великі сталі часу, які необхідно компенсувати. Тому можна вибрати I-

структуру регулятора ЕРС. Розімкнена передаточна функція контуру виглядатиме так

$$W_e^{poz}(p) = \frac{1}{pT_1} \cdot \frac{k_{\partial e} C_e \omega}{k_{\partial f} (1 + pT_{\mu e})}. \quad (4.56)$$

Частота зрізу контуру

$$\omega_{ce} = \frac{k_{\partial e} C_e \omega}{k_{\partial f} T_1}. \quad (4.57)$$

Оптимізуючи контур ЕРС, повинні мати оптимальну частоту зрізу

$$\omega_{ce}^{opt} = \frac{1}{aT_{\mu e}}, \quad (4.58)$$

де $a = 2 \dots 3$.

З формул (4.57) і (4.58) знаходимо T_1 . При цьому значення кутової швидкості двигуна треба приймати номінальним

$$T_1 = \frac{aT_{\mu e} k_{\partial e} C_e \omega_n}{k_{\partial f}}. \quad (4.59)$$

Задача 4.6. Визначити параметри І-регулятора при настроюванні контуру ЕРС на заданий оптимум.

Розв'язання задачі. Визначимо інтегральну сталу часу регулятора ЕРС з формули (4.59).

Конструктивна постійна двигуна C_e отримується через відому величину $C_e \Phi_n = 12,66$ Вс. (див. задачу 4.1).

$$C_e = \frac{C_e \Phi_n}{\Phi_n} = \frac{12,66}{0,142} = 89,15.$$

Приймаючи $a = 2$, $T_{\mu e} = 8T_{\mu}$ маємо

$$T_1 = \frac{aT_{\mu e} k_{\partial U} C_e \omega_n}{k_{\partial f}} = \frac{2 \cdot 8 \cdot 0,004 \cdot 89,15 \cdot 33}{66,7} = 2,82 \text{ с.}$$

Одноконтурне регулювання потоку. З (рис.4.8) видно, що канал регулювання потоку і ЕРС має тільки одну велику сталу часу $T_{f\Sigma}$ (стала часу T_a зворотного зв'язку приводиться до некомпенсованої сталої часу контуру ЕРС $T_{\mu e}$). Тому логічно було б припустити, що система регулювання потоку і ЕРС може бути одноконтурною. Але, у цьому випадку постає питання вибору параметру регулювання, тому що у першій зоні регулювання швидкості забезпечується сталість потоку, а у другій – сталість ЕРС. Таким чином, необхідний пристрій, який виконує вибір параметру регулювання. Таким пристроєм може бути пристрій виділення максимального значення (ПВМЗ) з двох сигналів – потоку або ЕРС (рис.4.10).

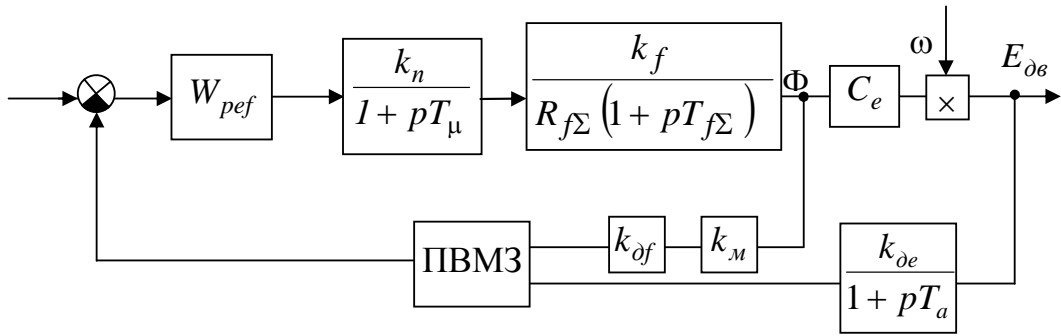


Рис. 4.10. Одноконтурна система регулювання потоку

В такій системі регулювання регулятор W_{pef} виконує функції регулятора потоку або ЕРС в залежності від того, який із сигналів, потоку чи ЕРС, більше. Якщо масштаби сигналів вибрані так, що вони рівні при номінальних значеннях $\Phi = \Phi_n$ і $E_{\delta\sigma} = E_{\delta\sigma,n}$, то в першій зоні регулювання швидкості регулятор виконує функції регулювання (стабілізації) потоку, а в другій – функції стабілізації ЕРС.

Для регулятора W_{pef} використовують ІІ-структуру виду (4.54). При цьому передаточна функція розімкнутого контуру регулювання буде мати вигляд

$$W_{ef}(p) = \frac{1+pT_2}{pT_1} \cdot \frac{k_n}{1+pT_\mu} \cdot \frac{k_f \cdot C_e \omega \cdot k_\delta}{R_{f\Sigma}(1+pT_{f\Sigma})}, \quad (4.60)$$

де $k_\delta = k_{\delta e} = k_{\delta f} k_m$, $k_m = E_{\delta\sigma,n} / \omega_n$ – коефіцієнт масштабування.

Частота зрізу контуру

$$\omega_{cef} = \frac{T_2 k_n k_f k_\delta C_e \omega}{T_1 R_{f\Sigma} T_{f\Sigma}}. \quad (4.61)$$

Для оптимізації контуру треба забезпечити частоту зрізу

$$\omega_{cef}^{onm} = \frac{1}{aT_\mu}, \quad (4.62)$$

де $a = 2 \dots 3$.

З формули (4.61) видно, що частота зрізу залежить від значень кутової швидкості і коефіцієнта k_f , які змінюються в процесі регулювання. Тому слід оптимізувати контур при найбільших значеннях цих величин, тобто при $\omega = \omega_{max}$ і $\Phi = \Phi_{min}$ ($k_f = k_{f,max}$). При цьому форсуюча ланка регулятора повинна компенсувати сталу часу $T_{f\Sigma}$. Тому $T_2 = T_{f\Sigma}$. Таким чином

$$T_2 = \frac{aT_{\mu}k_nk_{f,max}k_{\partial}C_e\omega_{max}}{R_{f\Sigma}}. \quad (4.63)$$

4.4. Вирівнювання навантаження і швидкості у багатодвигунових електроприводах

Проблема вирівнювання навантаження між електроприводами виникає у тому випадку, коли вони пов'язані загальним навантаженням. Наприклад, двигуни верхнього і нижнього валків кліті прокатного стана пов'язані між собою через метал, який прокатується. У цьому випадку двигуни знаходяться у різних умовах навантаження. Причин, що приводять до цього, існує декілька: нерівність діаметрів й лінійних швидкостей валків; нерівномірність нагріву злитку за висотою; різні умови тертя (окалина знижу швидше відпадає); злиток своєю вагою діє на нижній валок. Таким чином, двигун нижнього валка працює у більш тяжких умовах, ніж верхній.

Вибір системи вирівнювання навантаження залежить від силової схеми електропривода й ступеня механічного зв'язку між двигунами.

Найбільш простим способом вирівнювання навантаження у багатодвигунових електроприводах є послідовне з'єднання якорів двигунів, пов'язаних між собою навантаженням, і їх живлення від одного вентильного перетворювача. Такий спосіб можливий при достатньо жорсткому механічному зв'язку між двигунами, а також за умови, що ізоляція двигунів розрахована на подвійну номінальну напругу їх живлення.

Може бути паралельне з'єднання якорів двигунів з їх живленням від одного вентильного перетворювача. Такий варіант з'єднання знімає проблему можливого пробою ізоляції двигунів від перенапруги. При наявності жорсткого зв'язку між двигунами та відсутності регулювання потоку використовується зовнішній регулятор напруги (швидкості), а також формується зворотний зв'язок за струмом вентильного перетворювача. Струми окремих двигунів вирівнюються підбором додаткових резисторів у колах обмоток збудження.

Коли жорсткий зв'язок між двигунами відсутній, зворотний зв'язок формується за струмом найбільш навантаженого двигуна. Для цього використовується схема виділення найбільшого значення сигналу з датчиків струму. Для уникнення перевантаження вентильного перетворювача у разі перевантаження одразу двох двигунів може бути використаний додатково зворотний зв'язок за струмом самого перетворювача з відсічкою.

Запропоновані схемні рішення можуть бути використані у разі, коли можливе вирівнювання струмів за рахунок впливу на швидкість через регулятор напруги (швидкості). Така схема непридатна для використання при вирівнюванні, наприклад, навантаження між верхнім і нижнім валками кліті стана гарячої прокатки. Вирівнювання навантаження між двигунами

валків у цьому випадку призведе до зміни співвідношення між їх швидкостями, що є неприпустимим.

Вирівнювання навантаження між двигунами при їх живленні від одного перетворювача може бути забезпечене за рахунок регулювання потоку двигунів (рис. 4.11). Система керування будується з загальним регулятором ЕРС, який відповідає за встановлення загальної для обох двигунів швидкості, що відповідає завданню. Керування збуджувачів В31 та В32 виконується від регуляторів потоку РП1 і РП2. Завданням для регуляторів потоку є сигнал розузгодження між струмами якорів приводних двигунів, який надходить від регулятора вирівнювання навантаження РВН. Блок БВ3 визначає напрямок обертання привода і у залежності від цього зберігає напрямок дії на потоки двигунів при реверсі швидкості. При малих швидкостях вирівнювання навантаження шляхом впливу на потоки збудження неефективні. Тому за допомогою ключа К контур вирівнювання навантаження розмикається.

Регулятор РВН має статичну характеристику вирівнювання, в якій є зона нечутливості при малих розузгодженнях. Зона нечутливості необхідна для того, щоб система вирівнювання навантаження не реагувала на природну різницю статичних моментів на двигунах, наприклад, через різні умови роботи двигунів верхнього і нижнього валків кліті прокатного стана.

Синтез регуляторів потоку РП1 і РП2 виконується за методикою, представленою у п.4.3.

Синтез регулятора вирівнювання навантаження РВН виконується наступним чином. Розглянемо структурну схему (рис.4.12), що відповідає функціональній схемі рис.4.11. Згорнемо контури потоку. Маємо передавальну функцію замкнутого контуру потоку виду (4.55). Передаточна функція розімкнутого контуру вирівнювання навантаження при цьому матиме вигляд

$$W_{\text{вн}}^{\text{роз}}(p) = W_f^{\text{зам}}(p) \cdot C_e \cdot \omega \cdot \frac{1/R_{a\Sigma}}{1 + pT_{a\Sigma}} \cdot k_{\text{дІ}} \cdot k_{\text{рвн}}, \quad (4.64)$$

де $k_{\text{рвн}}$ – коефіцієнт підсилення пропорційного регулятора вирівнювання навантаження.

Частота зрізу контуру вирівнювання навантаження визначається з формули (4.64)

$$\omega_{\text{с,вн}} = \frac{C_e k_{\text{дІ}} k_{\text{рвн}} \omega}{k_{\text{дІ}} R_{a\Sigma} T_{a\Sigma}}. \quad (4.65)$$

Коефіцієнт підсилення $k_{\text{рвн}}$ вибирається шляхом отримання заданого коефіцієнта демпфування ξ при максимальній швидкості привода ω_{max} . Для цього забезпечується умова

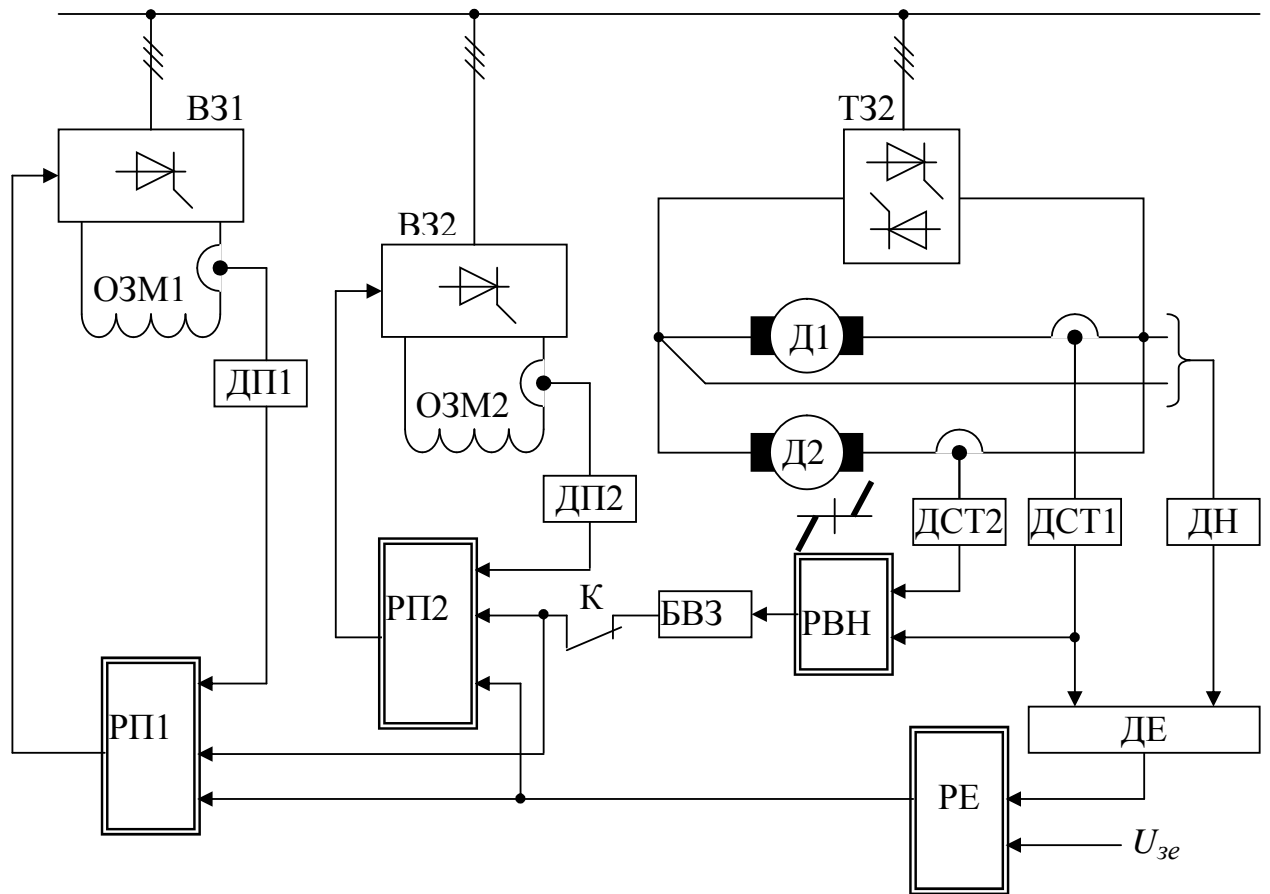


Рис.4.11. Вирівнювання навантаження за допомогою окремих вентиляльних збуджувачів: Д1, Д2 – двигуни; ОЗМ1, ОЗМ2 – обмотки збудження двигунів Д1 і Д2 відповідно; ДП1, ДП2 – датчики потоку; РП1, РП2 – регулятори потоку; РВН – регулятор вирівнювання навантаження; БВ3 – блок визначення знаку швидкості; ДСТ1, ДСТ2 – датчики струму; К – ключ; ДН – датчик напруги; ДЕ – датчик ЕРС; РЕ – регулятор ЕРС; U_{ze} – завдання на ЕРС.

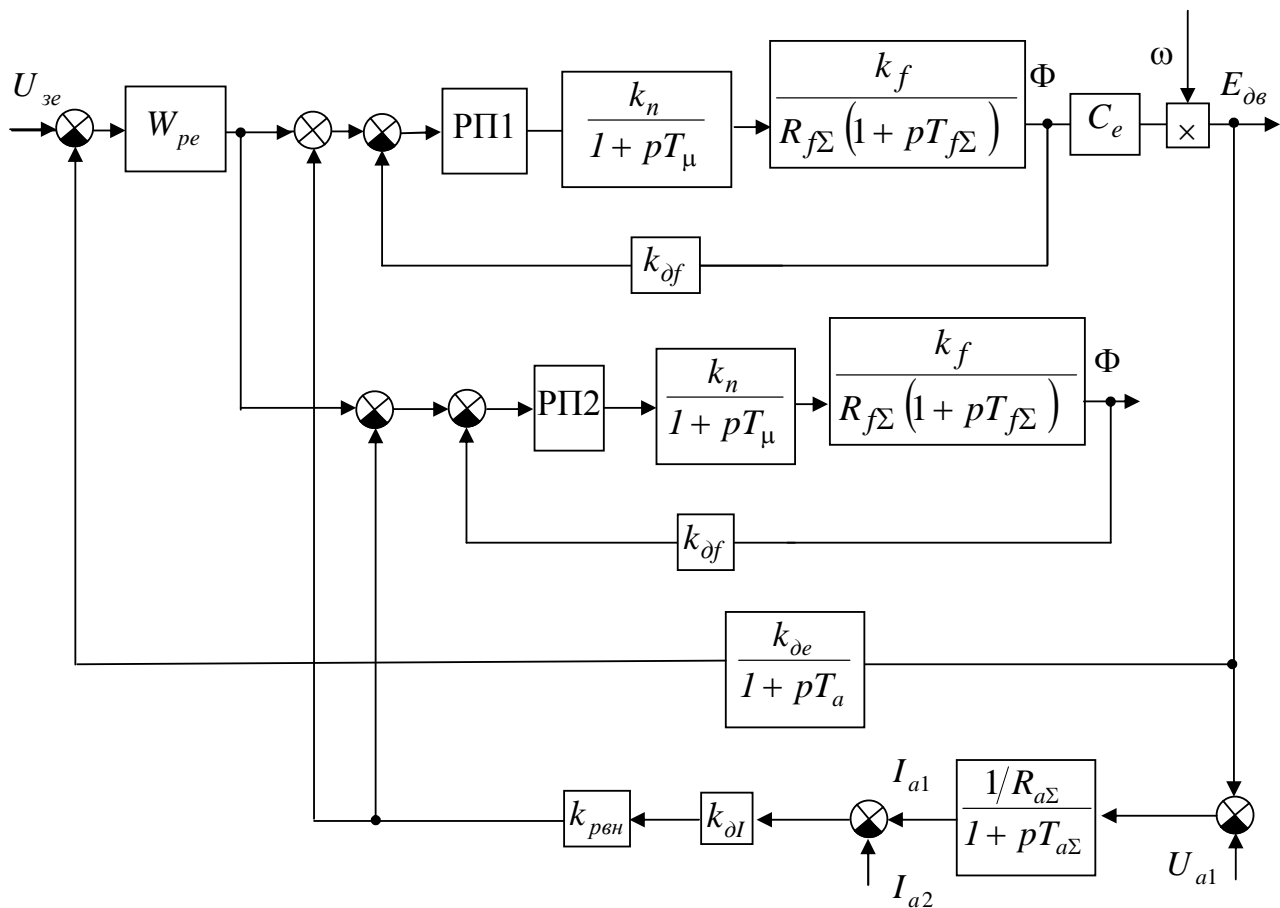


Рис. 4.12. Структурна схема системи вирівнювання навантаження за допомогою окремих вентильних збуджувачів

$$\omega_c \leq \frac{1}{4\xi^2 T_\mu}. \quad (4.66)$$

Задача 4.7. Визначити параметри регулятора вирівнювання навантаження за даними задач 4.5, 4.6.

Розв'язання задачі. Задаємось частотою зрізу контуру вирівнювання навантаження. Приймаємо настроювання контуру на технічний оптимум, тобто $\xi = \sqrt{2}/2$.

$$\omega_{c,вн}^{opt} \leq \frac{1}{4\xi^2 T_\mu} = \frac{1}{2 \cdot 0,004} = 125 \text{ с}^{-1}.$$

Маємо на увазі, що контур вирівнювання навантаження повине працювати повільніше, ніж контур струму. Оскільки $\omega_{cI} = 125 \text{ с}^{-1}$ (див. задачу 3.1), а $\omega_{c\omega} = 28,57 \text{ с}^{-1}$, то $\omega_{c,вн}$ може бути вибраний у цьому проміжку, але ближче до ω_{cI} . Приймаємо $\omega_{c,вн} = 2 \cdot \omega_{c\omega} = 57,14 \text{ с}^{-1}$.

$$k_{pвн} = \frac{k_{\partial f} R_{a\Sigma} T_{a\Sigma}}{C_e k_{\partial I} \omega_n} \omega_{c,вн} = \frac{66,7 \cdot 0,033 \cdot 0,028 \cdot 57,14}{89,15 \cdot 0,0016 \cdot 33} = 0,075.$$

Контур ЕРС є зовнішнім по відношенню до контуру вирівнювання навантаження. Тому, для синтезу регулятора ЕРС необхідно згорнути оптимізований контур регулювання навантаження. Далі синтез регулятора ЕРС виконується за методикою п. 4.2.

Замість зовнішнього контуру ЕРС (рис.4.11) може бути контур регулювання кутової швидкості одного з двигунів.

Вирівнювання навантаження між двигунами може здійснюватися при живленні двигунів від окремих вентильних перетворювачів шляхом керування напругою якоря (рис.4.13). Схемі (рис.4.13) відповідає структурна схема (рис.4.14).

У схемі (рис.4.13) сигнал розузгодження за струмами через регулятор вирівнювання навантаження РВН подається на входи самостійних систем керування, які забезпечують задане співвідношення швидкостей двигунів. У разі перевантаження, наприклад, двигуна Д2, сигнал, пропорційний різниці струмів $I_{a2} - I_{a1}$ (рис.4.14), збільшує напругу перетворювача, швидкість і струм двигуна Д1 і зменшує напругу перетворювача, швидкість і струм двигуна Д2. При цьому співвідношення швидкостей змінюється пропорційно зміні навантаження на одному з двигунів.

Згідно з (рис.4.14) система керування одного двигуна є триконтурною. Внутрішнім контуром є контур струму. Синтез регулятора струму виконується у відповідності до методики п. 3.1. Згорнутий контур струму має передаточну функцію виду (4.1). Зовнішніми по відношенню до контуру струму є контури вирівнювання навантаження і швидкості. Шляхом згортання контуру вирівнювання навантаження можна досягти одноконтурної структури. Для одного двигуна згорнутий контур вирівнювання навантаження має передаточну функцію $W_1(p)$ (рис.4.15). Спрощуючи, приймаємо регулятори швидкості і вирівнювання навантаження пропорційними відповідно із коефіцієнтом підсилення $k_{p\omega}$ і $k_{pвн}$. Тоді

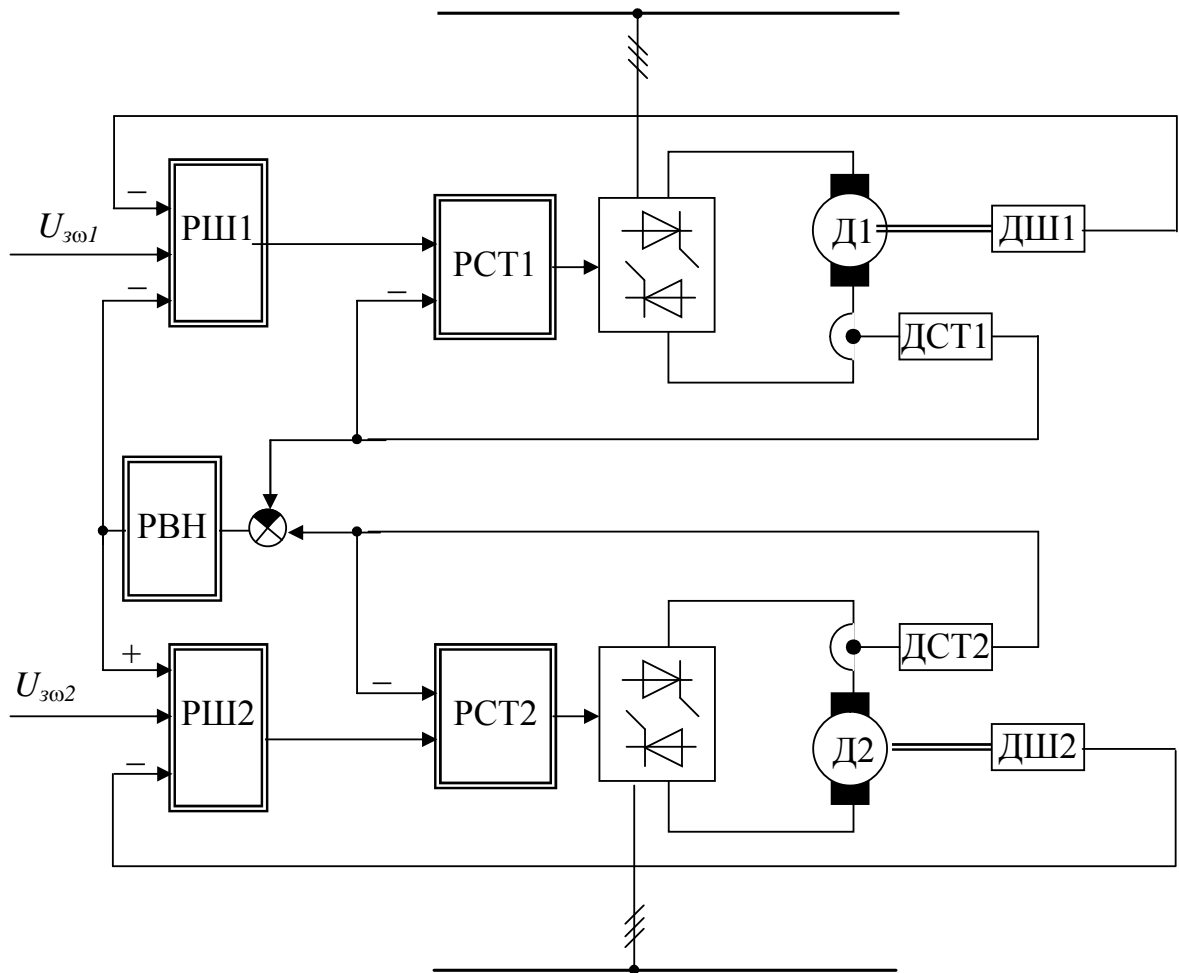


Рис.4.13. Вирівнювання навантаження при живленні двигунів від окремих вентильних перетворювачів : Д1, Д2 – двигуни; РСТ1, РСТ2– регулятори струму якоря відповідно двигуна Д1 та Д2; РВН – регулятор вирівнювання навантаження; ДСТ1, ДСТ2 – датчики струму; ДШ1, ДШ2 – датчики швидкості; U_{301} – завдання на швидкість

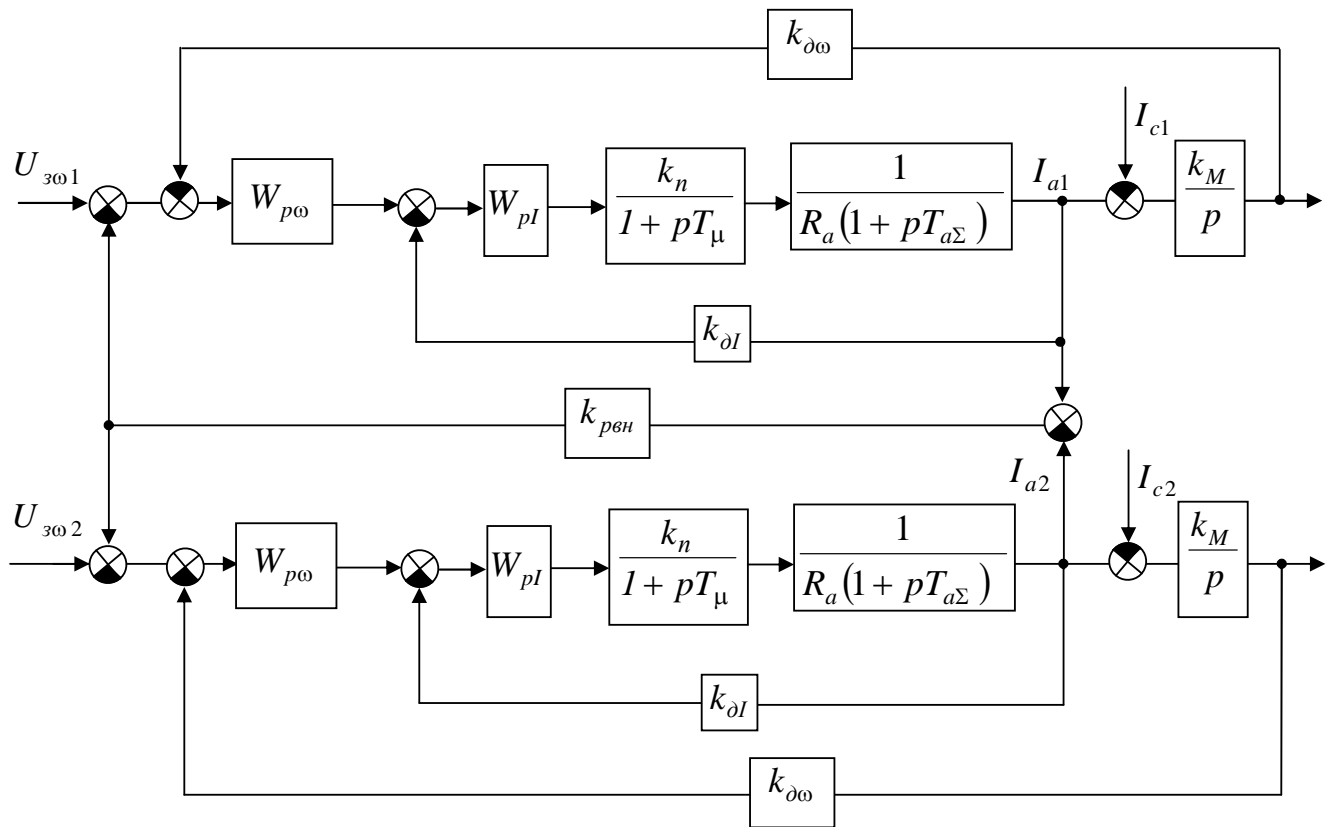


Рис. 4.14. Структурна схема системи вирівнювання навантаження при живленні двигунів від окремих вентильних перетворювачів

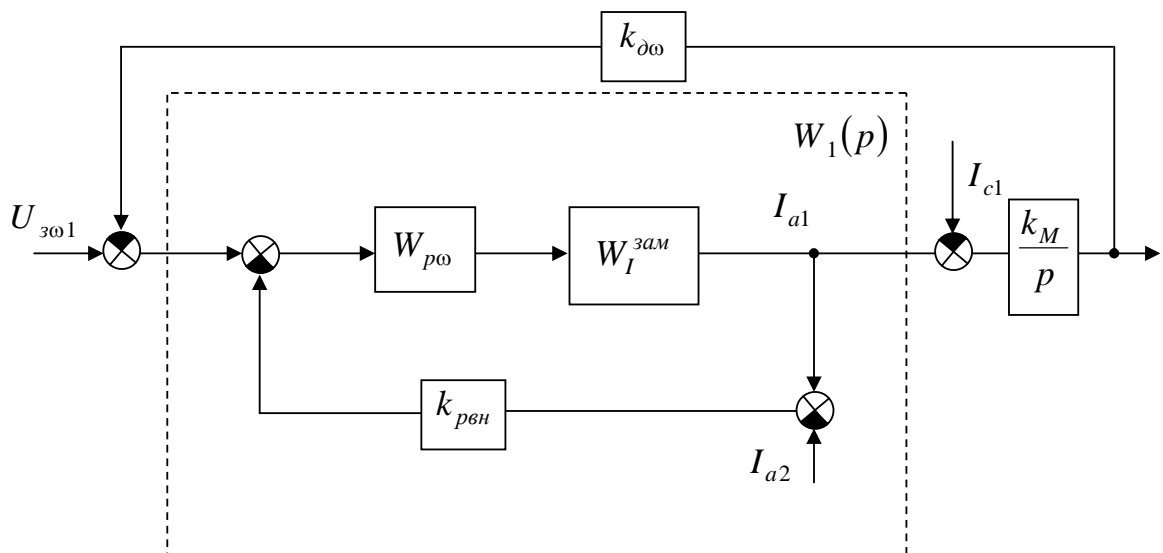


Рис. 4.15. Спосіб згортання контуру вирівнювання навантаження

$$W_1(p) = \frac{W_{p\omega}(p) \cdot W_I^{зам}(p)}{1 + W_{p\omega}(p) \cdot W_I^{зам}(p) \cdot k_{pвн}} = \frac{k_{p\omega} / (k_{\partial I} k_1)}{1 + T_{\mu\omega} / k_1}, \quad (4.67)$$

де $k_1 = 1 + \frac{k_{pвн} k_{p\omega}}{k_{\partial I}}$.

Розімкнений контур швидкості має передаточну функцію

$$W_{\omega}^{роз}(p) = W_1(p) \cdot \frac{k_M}{p} \cdot k_{\partial\omega}, \quad (4.68)$$

де $k_M = \frac{C_e \Phi_H}{J_{\Sigma}}$.

Частота зрізу контуру швидкості, що розглядається, дорівнює

$$\omega_{с\omega} = \frac{k_{p\omega} C_e \Phi_H k_{\partial\omega}}{k_{\partial I} k_1 J_{\Sigma}}. \quad (4.69)$$

Можна спростити вираз, маючи на увазі, що $k_1 \gg 1$. Тобто можна прийняти

$$k_1 \approx \frac{k_{pвн} k_{p\omega}}{k_{\partial I}}. \quad (4.70)$$

Тоді

$$\omega_{с\omega} = \frac{C_e \Phi_H k_{\partial\omega}}{k_{pвн} J_{\Sigma}}. \quad (4.71)$$

З формули (4.71) видно, що оптимізація контуру швидкості пов'язана із оптимізацією контуру вирівнювання навантаження. Тому визначення частоти зрізу контуру швидкості $\omega_{с\omega}^{онм}$ і коефіцієнта підсилювання регулятора вирівнювання навантаження $k_{pвн}$ необхідно виконувати ітераційно. Спочатку $\omega_{с\omega}^{онм}$ визначаємо за формулою (4.13). Порівнюючи формули (4.71) і (4.13), знаходимо $k_{pвн}$. Далі ці дані уточнюються в залежності від необхідної швидкодії контурів.

Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості $k_{p\omega}$ знаходиться за методикою, представленою у п.4.1, через визначену величину $\omega_{с\omega}^{онм}$ і формулу (4.69).

У деяких випадках, при слабкому механічному зв'язку між двигунами робота вузла вирівнювання навантаження супроводжується значним розуз-

годженням за швидкістю приводних механізмів, що не припускається умовами технологічного процесу. Для попередження такої ситуації використовують систему вирівнювання співвідношення швидкостей взаємопов'язаних електроприводів (рис.4.16).

При збільшенні, наприклад, навантаження на двигуні Д1, виникає розузгодження швидкостей $\omega_2 - \omega_1$ між двигунами Д1 і Д2. Через регулятор співвідношення швидкостей РСШ сигнал розузгодження з відповідними знаками подається на регулятори струму РСТ1 і РСТ2, підвищуючи завдання на струм двигуна Д1 і зменшуючи завдання на струм двигуна Д2. Таким чином, двигун Д1 розганяється, а двигун Д2 гальмується до рівня швидкості, що встановлюється загальними контурами регулювання.

Регулятор співвідношення швидкостей РСШ має зону нечутливості, призначену для забезпечення певного співвідношення швидкостей, яке визначене умовами технологічного процесу, або природними умовами.

Функціональній схемі (рис.4.16) відповідає структурна схема (рис.4.17).

Синтез регулятора РСШ виконується шляхом визначення частоти зрізу розімкнутого контуру швидкості з урахуванням контуру вирівнювання швидкостей. Для цього виконаємо певні структурні перетворення. Згорнемо контур струму та введемо суматор контуру вирівнювання співвідношення швидкостей на вхід регулятора кутової швидкості. Розглядаємо, як завжди, систему регулювання тільки одного двигуна, маючи на увазі еквівалентність перетворень для іншого. Отримуємо структурну схему, представлену на рис. 4.18.

Об'єднаємо суматори та зведемо структурну схему до одного зворотного зв'язку (рис.4.19).

Для розімкнутого контуру швидкості (рис.4.19) можна записати, приймаючи П-регулятор співвідношення швидкостей з коефіцієнтом підсилення k_{pcu} ,

$$W_{\omega}^{poz}(p) = W_{p\omega}(p) \cdot W_I^{zam}(p) \cdot \frac{k_M}{p} \cdot \left(\frac{k_{pcu}}{W_{p\omega}(p)} + k_{\delta\omega} \right). \quad (4.72)$$

Частота зрізу оптимізованого контуру (рис.4.19) повинна відповідати умові (4.66). Якщо використовується П-регулятор швидкості (4.6), умова оптимізації контуру (рис.4.19) з урахуванням формули (4.1) має вигляд

$$\omega_{scu} = \frac{k_{p\omega} \cdot k_M}{k_{\delta I}} \cdot \left(\frac{k_{pcu}}{k_{p\omega}} + k_{\delta\omega} \right) \leq \frac{1}{4\xi^2 T_{\mu\omega}}. \quad (4.73)$$

З формули (4.73) отримуємо значення для коефіцієнта підсилення k_{pcu} регулятора співвідношення швидкостей.

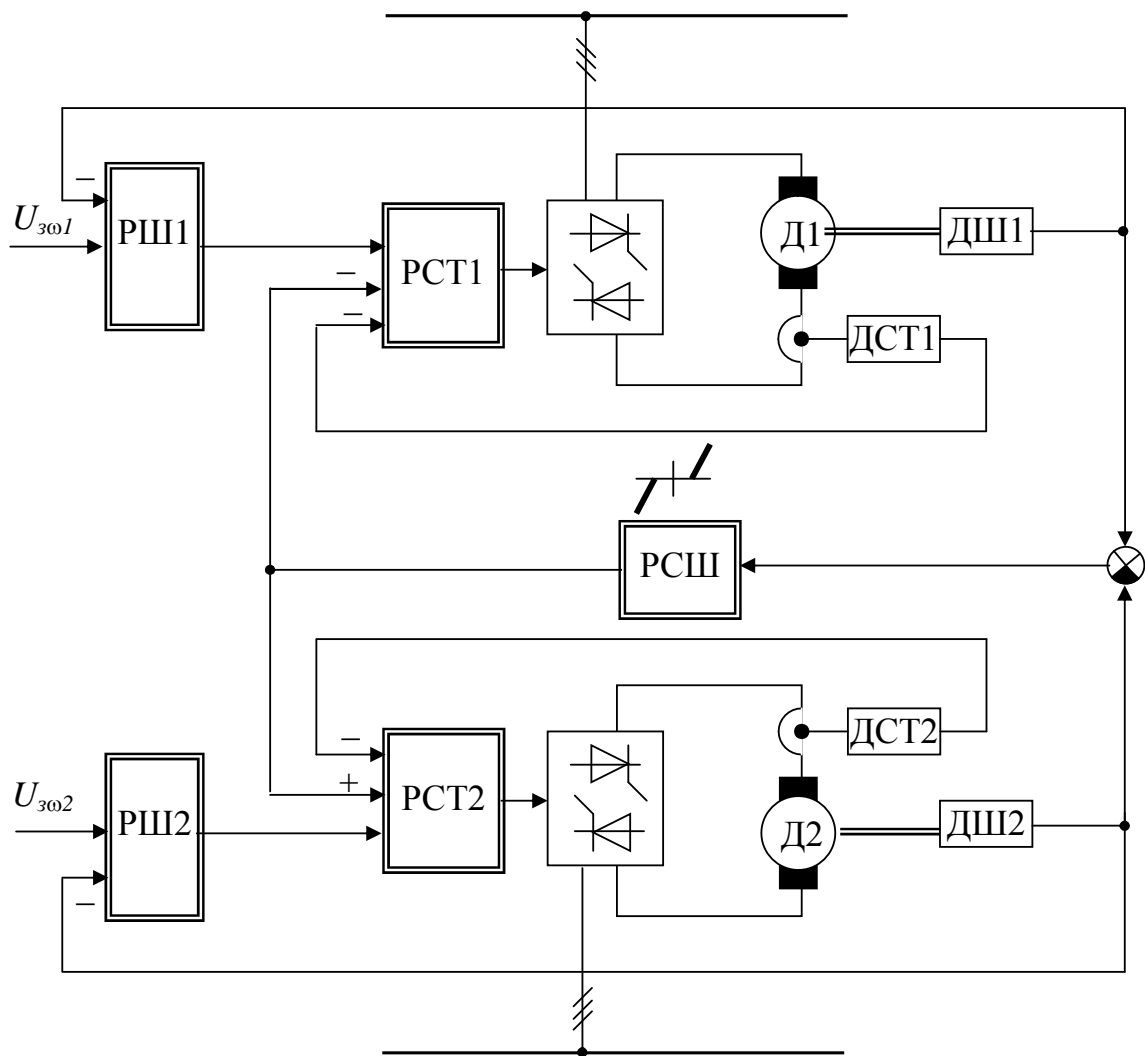


Рис.4.16. Вирівнювання співвідношення швидкостей при живленні двигунів від окремих вентильних перетворювачів : Д1, Д2 – двигуни; РСТ1, РСТ2– регулятори струму якоря відповідно двигуна Д1 та Д2; РСШ – регулятор співвідношення швидкостей; ДСТ1, ДСТ2 – датчики струму; ДШ1, ДШ2 – датчики швидкості; U_{301} – завдання на швидкість

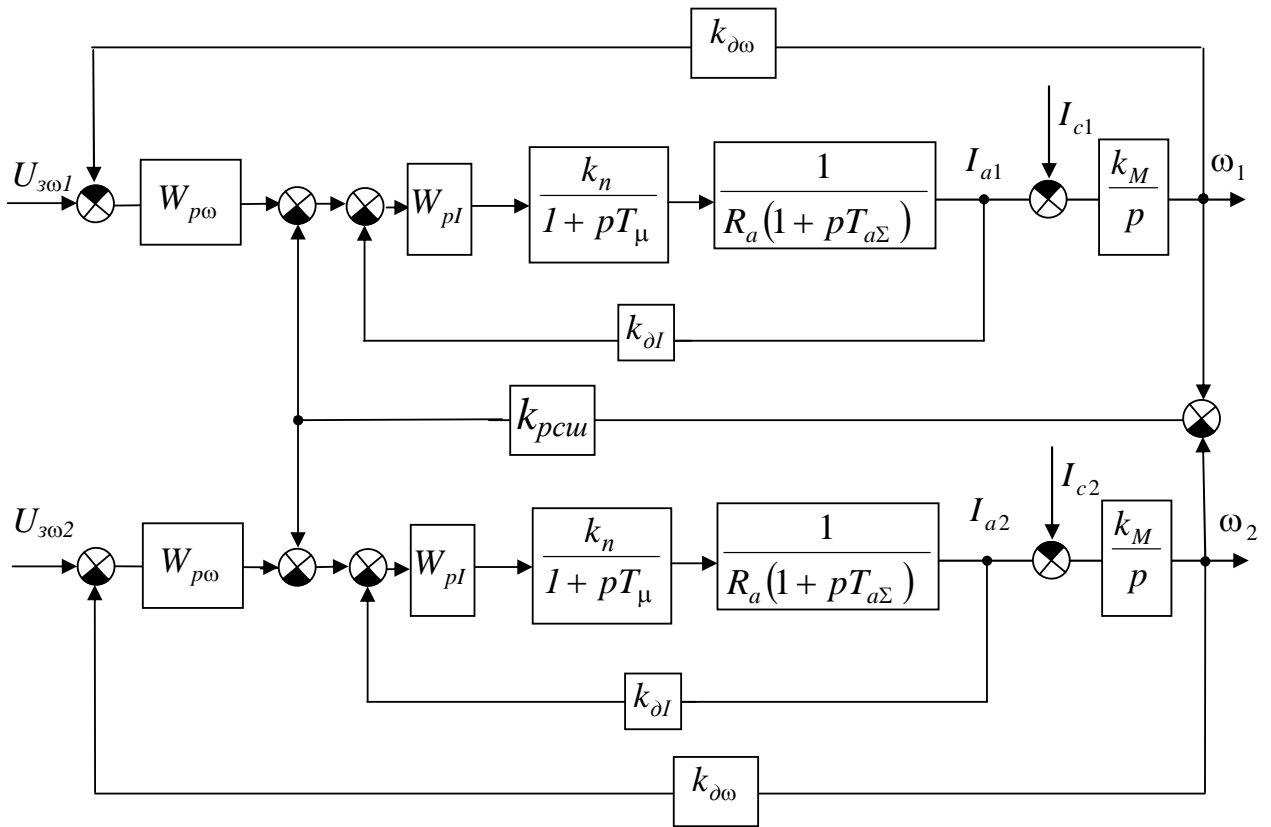


Рис. 4.17. Структурна схема системи вирівнювання співвідношення швидкостей

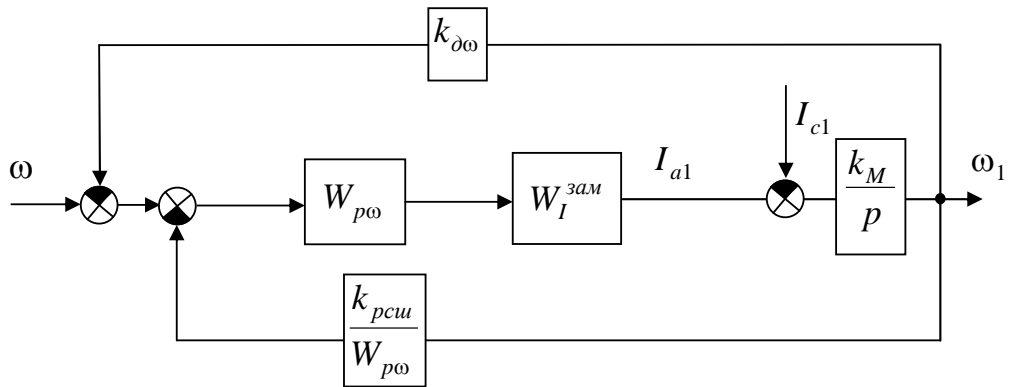


Рис. 4.18. Контур швидкості з контуром вирівнювання співвідношення швидкостей після структурних перетворень

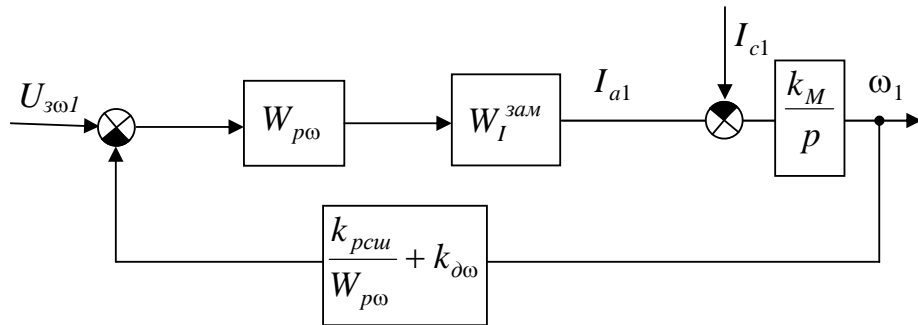


Рис. 4.19. Контур швидкості з урахуванням контуру вирівнювання співвідношення швидкостей

4.6. Регулювання параметрів режиму у системі електропривода "генератор-двигун"

Принципи регулювання параметрів режиму електропривода в системі Г-Д не відрізняються від принципів регулювання в системі "вентильний перетворювач-двигун", які були розглянуті раніше. В залежності від вимог до електропривода параметром регулювання може бути кутова швидкість, ЕРС, напруга, поле двигуна. Система регулювання будується на базі системи регулювання струму (п.3.5) з додаванням зовнішнього контуру регулювання відповідного параметру режиму. Двохзонне керування забезпечується введенням зовнішнього контуру регулювання ЕРС двигуна в канал регулювання його збудження. Як приклад, наведемо схему двухзонного регулювання кутової швидкості електропривода по системі Г-Д (рис.4.20).

Функціональній схемі (рис.4.20) регулювання швидкості без врахування системи регулювання потоку двигуна відповідає структурна схема (рис.4.21).

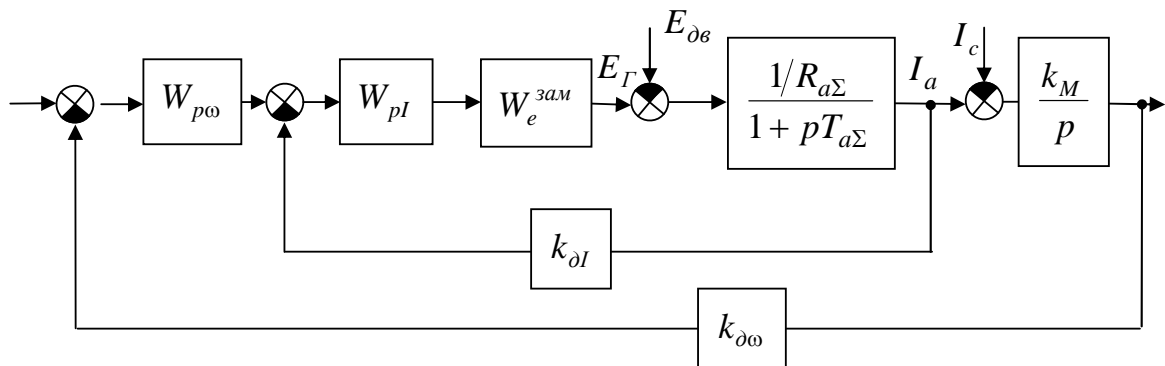


Рис. 4.21. Схема регулювання швидкості з під порядкованим контуром струму якоря в системі Г-Д

Передаточна функція замкнутого контуру ЕРС генератора $W_e^{зам}(p)$ визначається за формулою (3.39). Синтез регулятора струму двигуна $W_{pI}(p)$ відбуватиметься відповідно до формул (3.1) та (3.2), а регулятор швидкості $W_{p\omega}(p)$ визначається за методикою п.4.1 при виборі однієї із структур (4.6)...(4.8).

Синтез регуляторів системи регулювання поля двигуна виконується за алгоритмом, представленим у п.4.3.

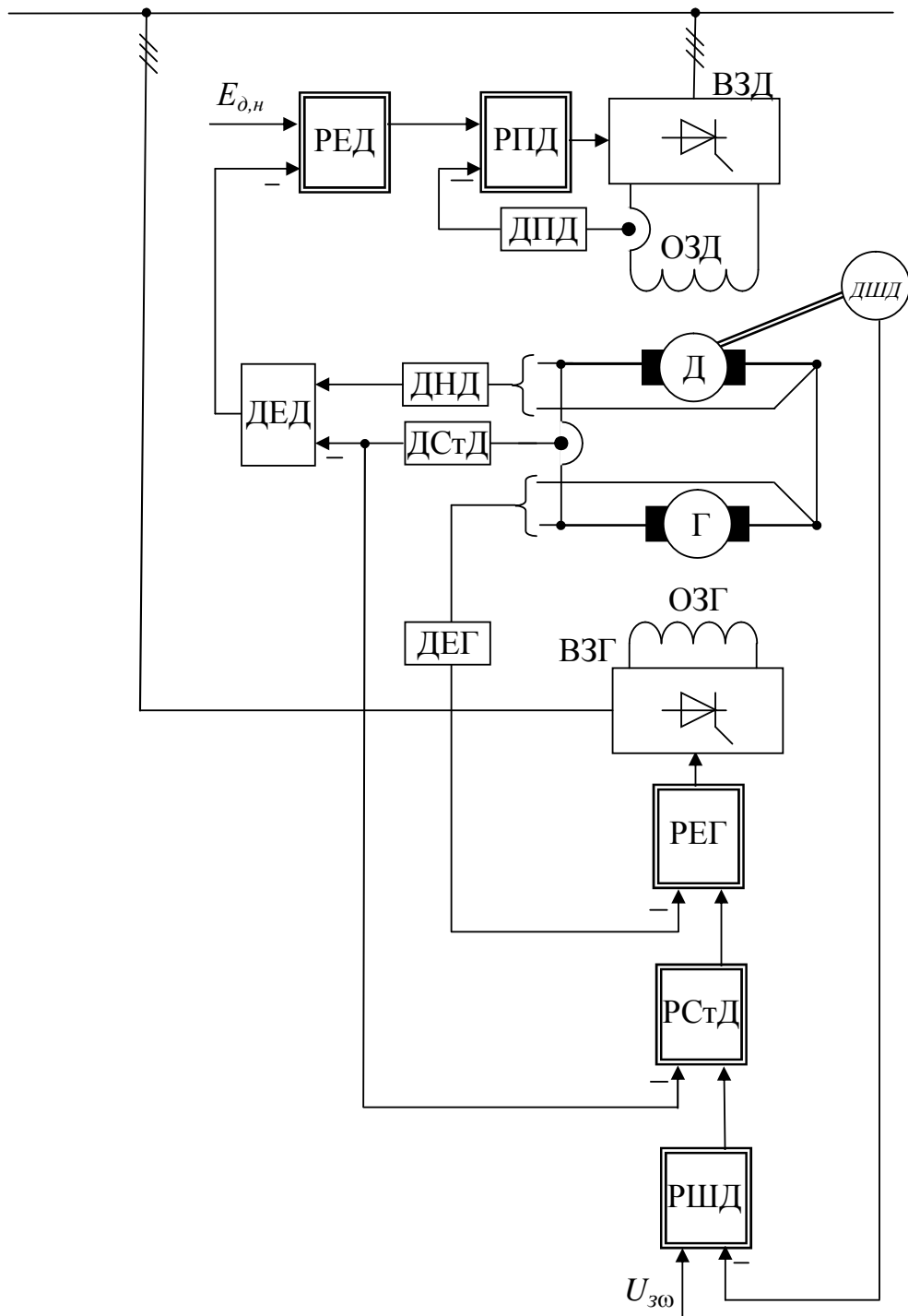


Рис.4.20. Схема двохзонного регулювання кутової швидкості електропривода по системі Г-Д: Г – генератор; Д – двигун; ОЗГ, ОЗД – обмотки збудження генератора і двигуна відповідно; ВЗГ, ВЗД – вентильний збуджувач генератора і двигуна відповідно; ДПД, РПД – датчик і регулятор потоку двигуна відповідно; ДЕГ, ДЕД – датчики ЕРС генератора і двигуна; РЕГ, РЕД – регулятори ЕРС генератора і двигуна; ДСтД – датчик струму двигуна; ДНД – датчик напруги двигуна; ДШД – датчик швидкості двигуна; РСтД – регулятор струму двигуна; РШД – регулятор швидкості двигуна; U_{30} – завдання на швидкість.

Контрольні запитання

1. Регулювання кутової швидкості. Якісні показники перехідного процесу для контуру швидкості. Основні типи регуляторів.
2. Синтез пропорційного регулятора швидкості через частоту зрізу.
3. Синтез пропорційно-інтегрального регулятора швидкості через частоту зрізу.
4. Синтез регулятора швидкості зі змінним статизмом через частоту зрізу.
5. Регулювання ЕРС. Синтез регулятора.
6. Регулювання напруги. Синтез регулятора шляхом приведення сталої часу якірного контуру до некомпенсованої сталої часу контуру напруги.
7. Регулювання напруги. Синтез регулятора через передаточну функцію замкнутої системи регулювання напруги.
8. Регулювання напруги. Синтез регулятора при визначенні сигналу напруги через ЕРС.
9. Двоконтурне регулювання полем двигуна. Синтез пропорційного регулятора потоку.
10. Двоконтурне регулювання полем двигуна. Синтез пропорційно-інтегрального регулятора потоку.
11. Двоконтурне регулювання полем двигуна. Синтез інтегрального регулятора ЕРС.
12. Одноконтурне регулювання полем двигуна. Синтез регулятора ЕРС.
13. Вирівнювання навантаження і швидкості у багатодвигунових електроприводах. Загальні питання.
14. Вирівнювання навантаження за допомогою окремих вентильних збуджувачів. Функціональна схема і принцип роботи.
15. Вирівнювання навантаження за допомогою окремих вентильних збуджувачів. Синтез регулятора вирівнювання навантаження.
16. Вирівнювання навантаження при живленні двигунів від окремих вентильних перетворювачів. Функціональна схема і принцип роботи.
17. Вирівнювання навантаження при живленні двигунів від окремих вентильних перетворювачів. Синтез регулятора вирівнювання навантаження.

18. Вирівнювання співвідношення швидкостей при живленні двигунів від окремих вентильних перетворювачів. Функціональна схема і принцип роботи.
19. Вирівнювання співвідношення швидкостей при живленні двигунів від окремих вентильних перетворювачів. Синтез регулятора вирівнювання співвідношення швидкостей.
20. Регулювання параметрів режиму у системі електропривода "генератор-двигун". Функціональна та структурна схема, принципи роботи. Синтез регуляторів.



ВЕНТИЛЬНІ ЕЛЕКТРОПРИВОДИ З РЕГУЛЮВАННЯМ ПОЛОЖЕННЯ

5.1. Точна зупинка електропривода

Електроприводи з регулюванням положення використовуються для приведення виконавчого органу механізму у задане положення та слідкування за положенням іншого механізму при взаємній синхронізації двох електроприводів за положенням.

Розглянемо основні принципи будовання систем керування положенням. Розділяють два режими системи керування положенням: 1) режим позиціонування; 2) режим слідкування.

Позиціонуванням називають такий режим роботи системи керування положенням, при якому задачею системи є переміщення робочого органу механізму з одного фіксованого положення у друге. Характер переміщення між цими положеннями визначається мінімізацією часу переміщення.

Слідкуванням називається такий режим роботи системи керування положенням, при якому забезпечується переміщення робочого органу механізму у відповідності до зміни керуючого впливу за довільним законом при похибці, яка не перевищує допустиму у всіх режимах при дії на систему збуджень. У слідкуючому режимі жоден регулятор не повинен бути обмежений.

В залежності від конкретних вимог можливі чотири варіанти автоматичного керування положенням:

1) точне позиціонування електропривода у заданих точках шляху за дискретними сигналами шляхових датчиків (точна зупинка електропривода);

2) неперервне регулювання положенням за відхиленням з метою забезпечення дозованих переміщень;

3) неперервне регулювання положення за відхиленням за заданою програмою (програмно-керований позиційний електропривод);

4) неперервне автоматизоване регулювання положення за відхиленням при довільному сигналі завдання (позиційний слідкуючий електропривод).

Точна зупинка електропривода виконується у два етапи. При цьому прийнято, що відключення двигуна та накладання механічного гальма виконується одночасно, а зусилля гальмування зростає до встановленого зна-

чення стрибком. На першому етапі подається керуючий імпульс на відключення двигуна. При цьому за час спрацювання апаратури t_a двигун не відключається від мережі і продовжує рух з кутовою швидкістю ω_{noch} , з якою від підійшов до шляхового датчика. На цьому етапі електропривод проходить кутовий шлях

$$\varphi' = \omega_{noch} t_a. \quad (5.1)$$

Після спрацювання апаратури двигун відключається від мережі, і накладається механічне гальмо. Настає другий етап процесу зупинки. На цьому етапі уся кінетична енергія електропривода йде на подолання сил статичного опору та механічного гальма. За цей етап електропривод проходить кутовий шлях φ''

$$\frac{J_{\Sigma} \omega_{noch}^2}{2} = (M_c + M_z) \varphi'', \quad (5.2)$$

де J_{Σ} – сумарний момент інерції електропривода; M_c – статичний момент опору; M_z – момент механічного гальма.

Загальний кутовий шлях електропривода з початку подачі керуючого імпульсу на відключення двигуна визначається з (5.1) та (5.2)

$$\varphi = \varphi' + \varphi'' = \omega_{noch} t_a + \frac{J_{\Sigma} \omega_{noch}^2}{2(M_c + M_z)}. \quad (5.3)$$

На першому етапі кутова швидкість електропривода є величиною постійною $\omega = \omega_{noch} = const$. На другому етапі кутова швидкість буде рівномірно зменшуватися з кутовим прискоренням $\varepsilon = (M_c + M_z)/J_{\Sigma}$. При цьому поточний шлях буде визначатися з (5.2) через зміну кінетичної енергії системи $(\omega_{noch}^2 - \omega^2)/2\varepsilon$. Таким чином, кутова швидкість ω на другому етапі визначатиметься як функція шляху φ у вигляді

$$\omega = \sqrt{\omega_{noch}^2 - 2\varepsilon\varphi}. \quad (5.4)$$

Через те, що усі параметри у формулі (5.3) у процесі зупинки не залишаються постійними, точна зупинка неможлива. Вона виконується з похибкою, яка визначається межами зміни параметрів, що входять до формули (5.3). Тобто існують відповідні максимальний φ_{max} та мінімальний φ_{min} кутові шляхи електропривода з моменту подачі імпульсу керування на зупинку двигуна. Вочевидь, що шляховий датчик необхідно ставити у проміжку між встановленими максимальним та мінімальним значеннями кутового шляху зупинки електропривода.

Основним фактором, який викликає неточність зупинки, є зміна навантаження електропривода, тому що ця зміна безпосередньо впливає на ди-

намічний момент i , таким чином, на відхилення початкової кутової швидкості двигуна на другому етапі зупинки.

Основним засобом зменшення похибки позиціонування є зниження середньої швидкості електропривода при підході до датчика точної зупинки та збільшення жорсткості механічної характеристики, яка відповідає роботі двигуна з цією зниженою швидкістю.

5.2. Автоматичне регулювання положення за відхиленням

Системи керування електроприводами з автоматичним регулюванням положення за відхиленням мають зовнішній контур положення і підпорядковані йому контури швидкості та струму. Регулятор положення у загальному випадку виконує функції обмеження граничного рівня завдання швидкості й нелінійного перетворення сигналу розузгодження за положенням. Підпорядковані контури налагоджуються у відповідності до описаного раніше.

Автоматичне регулювання положення за відхиленням потребує заміру кутового та лінійного переміщення робочого органу механізму. Схема регулятора положення у значній мірі залежить від типу датчика положення, який використовується. У багатьох випадках достатню точність забезпечують сельсинні схеми вимірювання положення. Сельсин-приймальник пов'язаний з виконавчим (робочим) органом, який приводиться двигуном. Сельсин-датчик є керуючим пристроєм. Поворот сельсин-датчика відносно положення, яке узгоджене із сельсин-приймальником, викликає появу сигналу розузгодженості змінного струму, значення якого визначається значенням сигналу розузгодження, а фаза – напрямом повороту відносно узгодженого положення. Сигнал розузгодженості надходить на фазочутливий випрямляч, який його випрямляє з полярністю, що визначається знаком розузгодженості. Вихідний сигнал фазочутливого випрямляча є вхідним для контуру положення, який відпрацьовує розузгодження, впливаючи на контур швидкості, а через нього – на двигун. Двигун обертається, досягаючи нового узгодженого положення сельсин-приймальника та сельсин-датчика.

У деяких серійних комплектних електроприводах (КТЭ, КТЭУ) для підвищення точності роботи при малих розузгодженнях за положенням використовуються так звані системи "грубого" та "точного" вимірювання положення. Для цього електропривод забезпечується датчиками "грубого" та "точного" відліку. У діапазоні малих кутів розузгодження працює система точного відліку, в якій датчик з'єднаний з валом робочого органу через редуктор, що підвищує, а при великих розузгодженнях контроль положення виконується датчиком "точного" відліку, який безпосередньо пов'язаний з валом робочого органа.

Для досягнення більш високої точності використовують цифрові системи керування. У цифровому контурі положення вимірювальним елемен-

том є дискретний датчик зворотного зв'язку, який разом із схемою перетворення представляє собою перетворювач "кут-код" або "лінійне переміщення-код". Обчислювальний пристрій (ЕОМ) порівнює у кодах сигнал завдання на положення та дійсне його значення, визначає код похибки і виробляє сигнал корекції у відповідності із закладеним у вигляді програми законом керування. Сигнал корекції у кодах надходить на перетворювач "код-аналоговий сигнал". Цей аналоговий сигнал є керуючим для аналогового контуру швидкості. Останнім часом поширеним є реалізація прямого цифрового керування координатами електропривода, у тому числі і положення.

Для системи автоматичного регулювання положення за відхиленням характерні наступні три режими:

1) режим малих переміщень, коли струм двигуна не досягає максимально допустимої величини, жоден з регуляторів не обмежується, а система працює як лінійна;

2) режим середніх переміщень, коли двигун працює з обмеженим струмом (обмежений регулятор швидкості), а швидкість двигуна не досягає максимальної, тобто ланка роботи з постійною швидкістю відсутня (трикутниковий графік швидкості);

3) режим великих переміщень, коли виконується трапецевидний графік швидкості за рахунок того, що деякий час регулятор положення обмежений, а регулятор струму обмежується при розганяннях та гальмуваннях.

У залежності від технологічних вимог електроприводи з регулюванням за положенням можуть бути розділені на дві групи: 1) електроприводи механізмів, продуктивність яких визначається тільки часом відпрацювання найбільшого переміщення (наприклад, електропривод летючих ножиць у режимі неперервного обертання з корекцією положення ножів); 2) електроприводи механізмів з мінімально можливим часом відпрацювання для кожної величини переміщення (наприклад, електропривод натискних гвинтів реверсивних обтискних й неперервних листових станів).

Для електроприводів першої групи доцільно використовувати лінійні регулятори положення як найбільш прості у реалізації. Для другої групи використовують регулятори положення з нелінійною характеристикою, наприклад, параболічною.

Для лінійного регулятора (режим малих переміщень) передаточна функція розімкнутого контуру положення впливає з рівняння $\varphi(p) = \omega(p)/p$

$$W_{\varphi}^{poz}(p) = W_{p\varphi}(p) \cdot W_{\omega}^{zam}(p) \cdot \frac{1}{p} \cdot k_{d\varphi}, \quad (5.5)$$

де $W_{p\varphi}(p)$ – передаточна функція регулятора положення; $W_{\omega}^{zam}(p)$ – передаточна функція замкненого контуру швидкості; $k_{d\varphi}$ – коефіцієнт передачі датчика положення.

За відомою технологією настроювання систем підлеглого керування, прийmemo $W_{\omega}^{зам}(p) \approx 1 / [(1 + pT_{\mu\phi}) \cdot k_{\partial\omega}]$, де $T_{\mu\phi} = 2T_{\mu\omega}$ – некомпенсована стала часу контуру положення. Тоді, у відповідності з принципами технічного оптимуму маємо пропорційний регулятор положення

$$W_{p\phi}(p) = \frac{1}{2T_{\mu\phi}} \cdot \frac{k_{\partial\omega}}{k_{\partial\phi}}. \quad (5.6)$$

Перехідний процес за таким налагодженням контуру регулювання положення буде здійснюватися з перерегулюванням до 4,3% (без урахування інерційності фільтрів у зворотному зв'язку за швидкістю). Дія на механізм активного моменту навантаження призводить до статичної похибки у регулюванні.

Якщо параметри регулятора положення вибрані за умови малих переміщень (лінійна система), то відпрацювання середніх та великих переміщень буде виконуватися зі значним перерегулюванням. Тому відпрацювання середніх та великих переміщень вимагає використання нелінійного регулятора положення.

5.3. Параболічний регулятор положення

Для визначення передаточної функції регулятора положення при середніх та великих переміщеннях прийmemo, що у системі електропривода коефіцієнт підсилення регулятора швидкості достатньо великий, що навіть незначний сигнал розугодження за положенням призводить до насичення регулятора швидкості. Крім того, струмовий контур повинен мати значну швидкодію, що дозволяє розглядати струм без урахування його перехідних процесів. За таких умов забезпечується трикутнікова тахограма і прямокутніковий графік струму (рис.5.1).

З трикутнікової тахограми впливає, що завдання на переміщення φ_3 визначається площиною трикутника ABC (рис.5.1), тобто

$$\varphi_3 = \frac{\omega_1 [(t_1 - t_0) + (t_2 - t_1)]}{2}. \quad (5.7)$$

З урахуванням рівняння руху електропривода маємо

$$\left. \begin{aligned} t_1 - t_0 &= \frac{J_{\Sigma} \omega_1}{M_{\max} - M_c}, \\ t_2 - t_1 &= \frac{J_{\Sigma} \omega_1}{M_{\max} + M_c}, \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

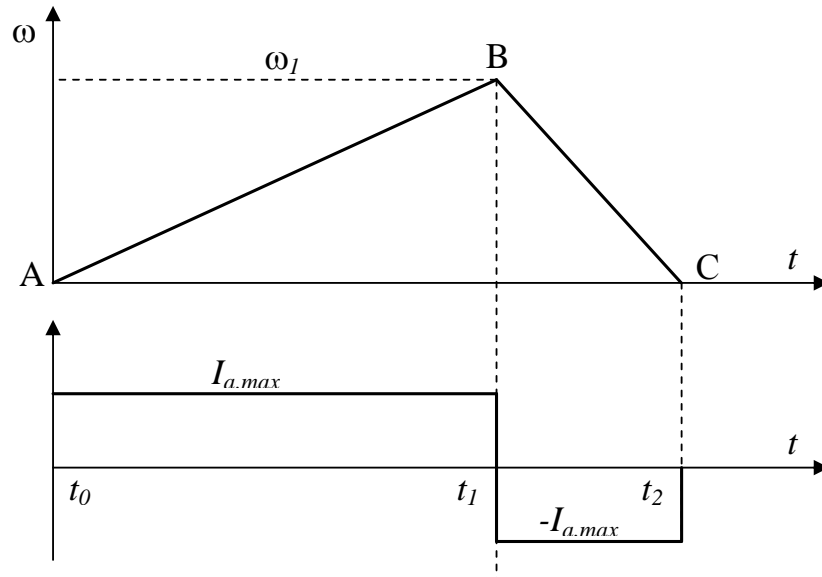


Рис. 5.1. Тахограма та графік струму при середніх переміщеннях

де $M_{\max} = C_M \Phi_n I_{a,\max}$, M_c – момент опору двигуна, J_Σ – сумарний момент інерції обертаючих мас.

З формул (5.7) і (5.8) виходить

$$\varphi_3 = \frac{\omega_1^2 J_\Sigma M_{\max}}{M_{\max}^2 - M_c^2}. \quad (5.9)$$

Для точки В тахограми (рис.5.1) у вузлі порівняння регулятора швидкості є дійсним рівняння

$$(\varphi_3 - \varphi_1) \cdot k_{\partial\varphi} \cdot k_{p\varphi} = k_{\partial\omega} \cdot \omega_1, \quad (5.10)$$

де $k_{\partial\varphi}$, $k_{\partial\omega}$ – відповідно коефіцієнти зворотних зв'язків за положенням та швидкістю, $k_{p\varphi}$ – коефіцієнт підсилення пропорційного регулятора положення.

З формул (5.9) і (5.10) маємо

$$k_{p\varphi}^2 = \frac{k_{\partial\omega}^2}{k_{\partial\varphi}^2} \cdot \frac{M_{\max}^2 - M_c^2}{J_\Sigma M_{\max}} \cdot \frac{1}{\varphi_3 (1 - \varphi_1/\varphi_3)^2}. \quad (5.11)$$

З трикуткової тахограми (рис. 5.1) видно, що $\varphi_1/\varphi_3 = (t_1 - t_0)/(t_2 - t_0)$. Тому, з урахуванням формул (5.8) отримуємо формулу для визначення коефіцієнта підсилення регулятора положення, який забезпечує відпрацювання заданого середнього переміщення без перерегулювання та дотягування

$$k_{p\varphi} = \frac{2k_{\partial\omega}}{k_{\partial\varphi}} \sqrt{\frac{M_{\max}}{\varphi_3 J_{\Sigma}} \cdot \frac{M_{\max} + M_c}{M_{\max} - M_c}}. \quad (5.12)$$

З формули (5.12) виходить, що значення коефіцієнта підсилення регулятора положення повинно змінюватися у залежності від завдання на переміщення та моменту навантаження на валу двигуна. При іншому значенні φ_3 та тому ж $k_{p\varphi}$ графік швидкості буде відрізнятися від трикутного. Так, при $\varphi'_3 < \varphi_3$ рівняння (5.10) виконується при меншому значенні швидкості двигуна ω'_1 . Через те, що кутова швидкість електропривода при насиченому регуляторі швидкості змінюється з часом лінійно, а кутове положення – у квадратичній залежності, обов'язково наступить момент, коли регулятор швидкості вийде з обмеження і буде забезпечувати відпрацювання завдання, яке надходить з регулятора положення. Оскільки вихід регулятора положення змінюється параболічно, тобто при малих значеннях вихідного сигналу швидкість його зміни постійно зменшується, то буде мати місце процес дотягування.

Якщо у формулі (5.12) нехтувати моментом активного опору, то тахограма буде рівнобедреним трикутником, а переміщення φ_1 у момент початку гальмування буде дорівнювати $\Delta\varphi_1 = \varphi_3/2$.

У цьому випадку формула (5.12) прийме вигляд

$$k_{p\varphi} = \frac{k_{\partial\omega}}{k_{\partial\varphi}} \sqrt{\frac{2\omega_0}{T_M \Delta\varphi_1}}, \quad (5.13)$$

де $T_M = \frac{J_{\Sigma}\omega_0}{M_{\max}}$ – електромеханічна стала часу електропривода, ω_0 – кутова швидкість ідеального неробочого ходу.

Для визначення коефіцієнта настроювання $k_{p\varphi}^H$ у формулі (5.13) приймають $\Delta\varphi_1 = \varphi_3/2$. З формул (5.9) і (5.13) при умові, що $\omega_1 = \omega_0$, виходить

$$\varphi_3^H = 2\Delta\varphi_1^H = T_M \omega_0, \quad (5.14)$$

$$k_{p\varphi}^H = \frac{2k_{\partial\omega}}{k_{\partial\varphi} T_M}. \quad (5.15)$$

Поточне значення вихідного сигналу $U_{p\varphi}$ регулятора положення дорівнює

$$U_{p\phi} = k_{p\phi} \cdot \Delta\phi \cdot k_{\partial\phi} = k_{\partial\omega} \sqrt{\frac{2\omega_0 \Delta\phi}{T_M}}. \quad (5.16)$$

З формули (5.16) видно, що існує параболічна залежність вихідного сигналу регулятора положення від сигналу розузгодження між завданням на положення і його реальним значенням (рис. 5.2).

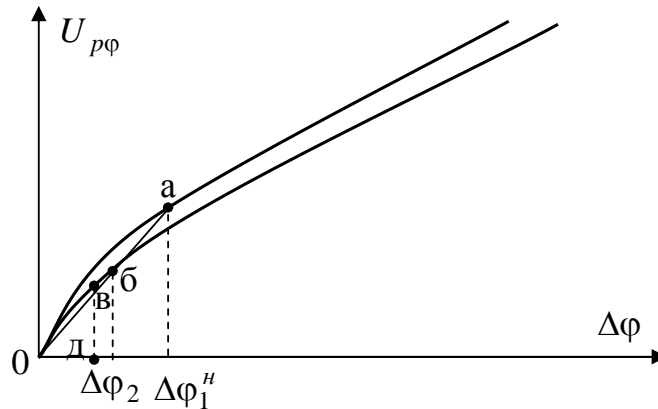


Рис. 5.2. Характеристика параболічного регулятора положення

Параболічна нелінійність забезпечує постійне уповільнення швидкості після розгону до точки В і трикутникову тахограму (рис. 5.1). Однак при малих переміщеннях, коли $\Delta\phi_1 \rightarrow 0$, маємо $k_{p\phi} \rightarrow \infty$. Тому при малих переміщеннях виконують апроксимацію параболі прямою лінією при умові (5.6)

$$k_{p\phi} = W_{p\phi}(p) = \frac{1}{2T_{\mu\phi}} \cdot \frac{k_{\partial\omega}}{k_{\partial\phi}}. \quad (5.17)$$

Таким чином, якщо переміщення менше $\Delta\phi_1^H$, то регулятор положення необхідно настроювати на коефіцієнт підсилення за формулою (5.17), а у іншому разі – за формулою (5.15).

У реальних умовах роботи позиційного електропривода завжди існує статичне навантаження, час реверсу і спаду струму має кінцеве значення. При малих розузгодженнях струм не досягає рівня обмеження або обмежується тільки при розгоні. Величина розузгодження, при якій досягається рівень струмообмеження, залежить від коефіцієнта підсилення регулятора швидкості. Тому, з метою отримання аперіодичного процесу позиціонування, необхідно починати гальмування раніше, ніж у ідеалізованому випадку. Для цього пропонується узгодження лінійної і нелінійної частини характеристики виконувати не у точці "а", а у точці "б" (рис.5.2), з паралельним перенесенням характеристики у нульову точку.

Точка "б" визначається як $\Delta\phi_2 = 0,5\Delta\phi_1^H$.

Значна частина позиційних електроприводів металургійних механізмів працюють із змінним статичним моментом. Для таких приводів необхідне використання нелінійного регулятора положення із зоною нечутливості. Величина зони нечутливості визначається рівнем статичної похибки позиціонування, яка пов'язана із статичним навантаженням. У сталому режимі у вузлі порівняння регулятора струму є дійсним рівняння

$$k_{p\phi} \cdot k_{p\omega} \cdot \Delta\phi_c = k_{dI} \cdot I_c. \quad (5.18)$$

З формули (5.18) випливає значення величини зони нечутливості Δ

$$\Delta\phi_c < \Delta. \quad (5.19)$$

Зона нечутливості на (рис.5.2) представлена ломаною "0-д-в".

5.4. Системи електричної синхронізації

У деяких допоміжних механізмах металургійного обладнання використовується двохдвигуновий варіант електропривода, побудованого за принципами регулювання положення. Наприклад, натискні пристрої мають у своїй конструкції два натискних гвинта, які впливають на положення лівої і правої опори верхнього валка прокатної кліти. Переміщення цих гвинтів повинно бути одночасним і однаковим, інакше може виникнути перекис вісі обертання валка. Тому необхідна синхронізація роботи електроприводів лівого і правого гвинтів.

Синхронізація може бути виконана за допомогою механічних пристроїв (роз'єднувальна шестерня, поз.5 на рис.2.13), або може бути електрична синхронізація роботи електроприводів.

Електроприводи з одним двигуном, або з механічною синхронізацією положення двох двигунів, будуються за принципами, викладеними у п.5.3.

Для електроприводів з електричною синхронізацією положення системи керування будуються за принципом пріоритету синхронізації положення по відношенню до синхронізації переміщення.

Використання позиційного електропривода з електричною синхронізацією має переваги над електроприводом з механічною синхронізацією через спрощення механічного обладнання, покращання динамічних показників електропривода за рахунок зменшення загального моменту інерції, усунення невизначеності у положенні двох механізмів через наявність зазору у механічних передачах при механічній синхронізації.

Розглянемо деякі системи електричної синхронізації положення (рис.5.3 – рис. 5.5). При цьому параметри двигунів приймаються однаковими, а контури струму системи керування розглядаються оптимізованими і замкнутими.

Система синхронізації положення з корекцією на вході регуляторів струму (рис.5.3). Пріоритет каналу синхронізації забезпечується за рахунок значних коефіцієнтів підсилення регулятора положення $W_{p\varphi}$, регуляторів швидкості $W_{p\omega}$ і обмежуючих підсилювачів ПО. Тому всі вони знаходяться у насиченні, а контури швидкості розімкнуті. Завдання на переміщення виконується сигналом φ_3 на вході регулятора положення.

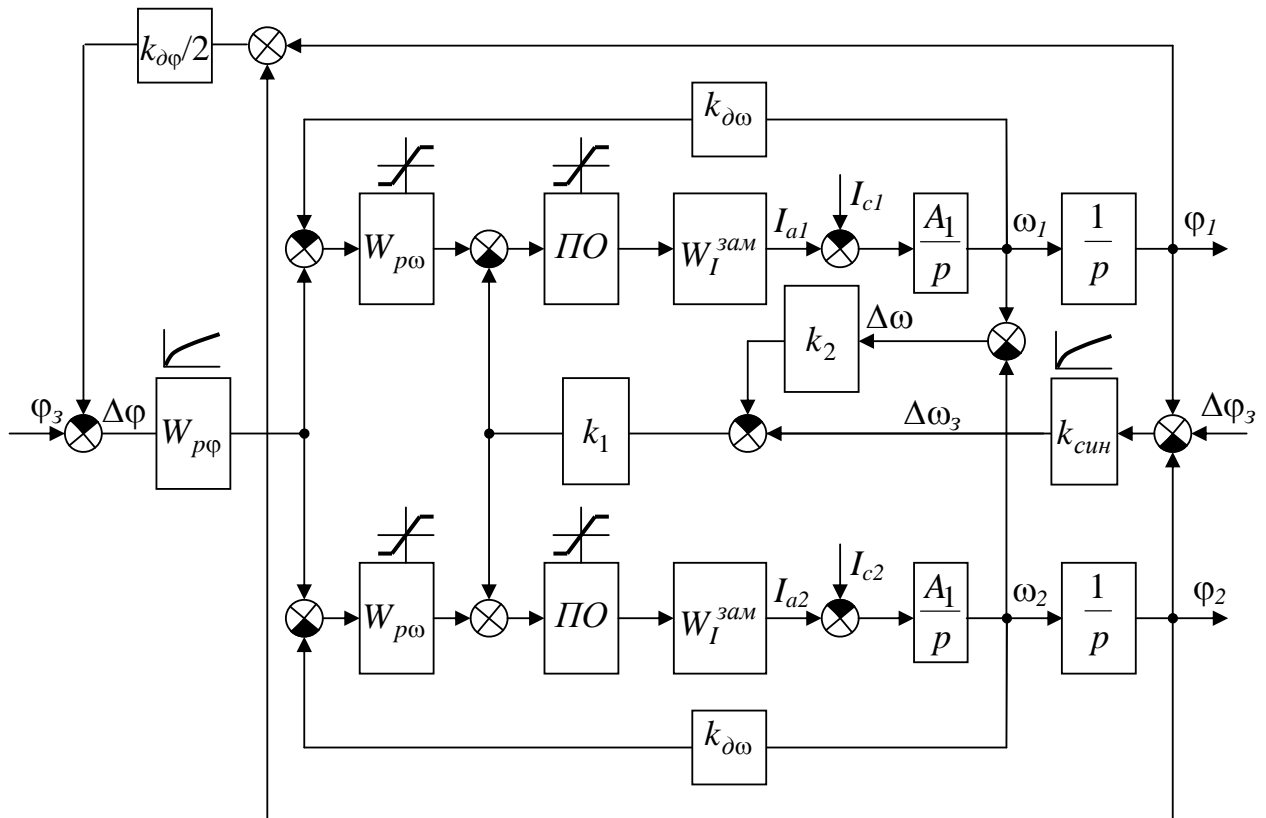


Рис.5.3. Система синхронізації положення з корекцією на вході регуляторів струму

Якщо виникає розузгодження $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, більше від заданого $\Delta\varphi_3$, то через регулятор $k_{син}$ і підсилювач k_1 сигнал розузгодження надходить на ПО з протилежними знаками, виводячи відповідний підсилювач з насичення (де сумарний вхідний сигнал зменшується у результаті виникнення розузгодження). Вихідний сигнал цього підсилювача зменшується, зменшуючи кутову швидкість відповідного двигуна. Виникає сигнал розузгодження кутових швидкостей двигунів $\Delta\omega$. Так буде продовжуватися до тих пір, поки не виникне приблизне рівняння $\Delta\omega \cdot k_2 \approx \Delta\omega_3$. Таким чином система підтримує розузгодження швидкостей двигунів на рівні, який забезпечує задане розузгодження положень $\Delta\varphi_3$.

У сталому режимі переміщення включається контур швидкості. У цьому випадку працюють обидва контури – контур синхронізації і контури швидкості. Однак, за рахунок великого коефіцієнта підсилення k_1 пріоритет у обробці розузгодження є за контуром синхронізації.

У такій системі синхронізації відсутня похибка синхронізації на малих швидкостях. Однак, при ненасиченому регуляторі швидкості передаточна функція контуру швидкості відрізняється від технічного оптимуму, що вимагає корегування передаточної функції регулятора швидкості.

Виконаємо деякі структурні перетворення структурної схеми (рис. 5.3). При цьому вважаємо, що схема є симетричною відносно контурів швидкості і можна розглядати тільки одну її гілку. Крім того, приймаємо, що додаткові сигнали, що надходять з однієї гілки схеми до другої, є незмінними. Тобто приймається, що на розузгодження за положенням та швидкістю реагує одна гілка схеми. Тоді з (рис. 5.3) виходить (рис.5.4)

Оскільки обмежуючий підсилювач ПО виконує функції суматора і обмежувача, його коефіцієнт підсилення дорівнює одиниці. Після структурних перетворень з (рис. 5.4) отримуємо (рис.5.5), приймаючи $W_{p\omega}(p) = k_{p\omega}$.

Передаточна функція замкненого контуру швидкості з одиничним зворотним зв'язком і урахуванням того, що $W_I^{зам}(p) \approx \frac{1/k_{\partial I}}{1 + 2pT_\mu}$ (див. рис.5.6)

$$W_\omega^{зам}(p) = \frac{k_{p\omega} W_I^{зам}(p) A_1}{p \left[1 + \frac{k_{p\omega} W_I^{зам}(p) A_1}{p} \cdot \left(k_{\partial\omega} + \frac{k_1 k_2}{k_{p\omega}} \right) \right]} = \frac{\left(\frac{k_e A}{2T_\mu} \right)}{p^2 + p \left(\frac{1}{2T_\mu} \right) + \left(\frac{k_e A}{2T_\mu} \right)}, \quad (5.20)$$

$$\text{де } k_e = k_{\partial\omega} k_{p\omega} + k_1 k_2. \quad A_1 = A \cdot k_{\partial I} = \frac{R_{a\Sigma} k_{\partial\omega}}{C_e \Phi_H T_{M\Sigma, H}}.$$

Оптимізований за технічним оптимумом замкнутий контур швидкості має передаточну функцію

$$W_{\omega,опт}(p) = \frac{\omega_{c\omega}^2}{p^2 + (2\xi_\omega \omega_{c\omega})p + \omega_{c\omega}^2}, \quad (5.21)$$

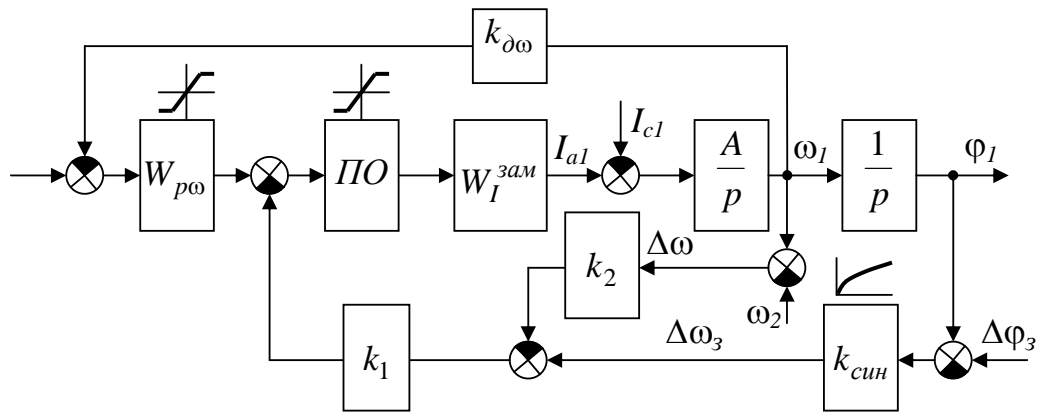


Рис.5.4. Одна з гілок системи синхронізації положення з корекцією на вході регуляторів струму

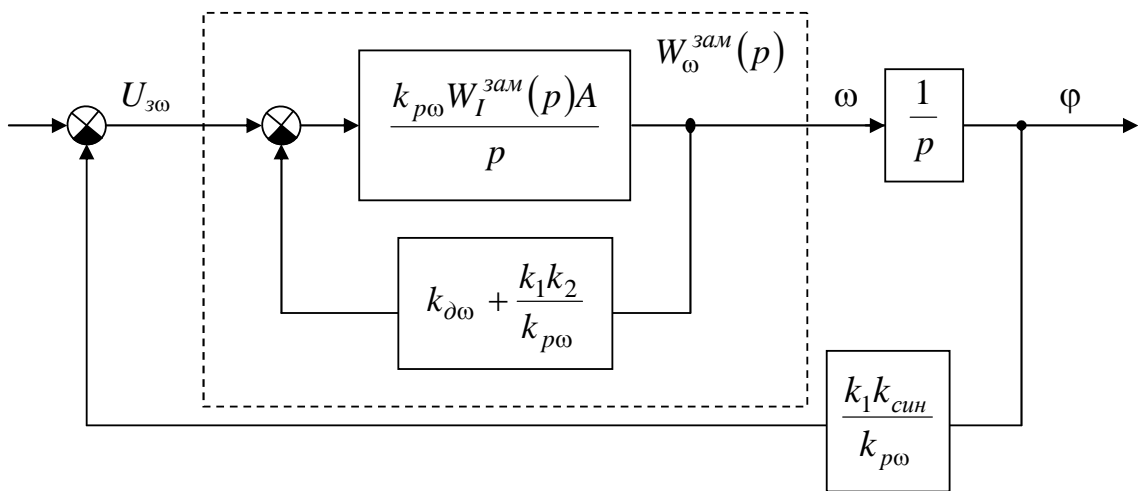


Рис.5.5. Одна з гілок системи синхронізації положення з корекцією на вході регуляторів струму після структурних перетворень

де $\xi_{\omega} = \sqrt{2}/2$ – коефіцієнт демпфування контуру швидкості, $\omega_{c\omega}$ – частота власних коливань контуру швидкості, $\omega_{c\omega}^2 = 1/(8T_{\mu}^2)$, $T_{\mu\omega} = 2T_{\mu}$ для технічного оптимума.

Порівнюючи коефіцієнти членів характеристичного рівняння у формулах (5.20) і (5.21), знаходимо

$$\frac{k_e A}{2T_{\mu}} = \frac{1}{8T_{\mu}^2}. \quad (5.22)$$

Отримуємо з рівняння (5.22)

$$k_1 k_2 + k_{\partial\omega} k_{p\omega} = \frac{1}{2T_{\mu\omega} A}. \quad (5.23)$$

Можна прийняти $k_2 = 1$, а $k_{p\omega}$ визначати за технічним оптимумом, тобто за формулою (4.10). Тоді з формули (5.23) маємо для $a = 2$

$$k_1 = \frac{1}{2T_{\mu\omega} A} (1 - k_{\partial\omega}) \approx \frac{1}{2T_{\mu\omega} A} = k_{p\omega} = k_e. \quad (5.24)$$

Наявність додаткових контурів синхронізації у системі керування (рис. 5.4) призводить до того, що у замкнутого оптимізованого контуру швидкості з'являється додатковий зворотній зв'язок (рис. 5.4). Таким чином, для оптимізації контуру положення виникає необхідність у корекції налагоджень його параметрів.

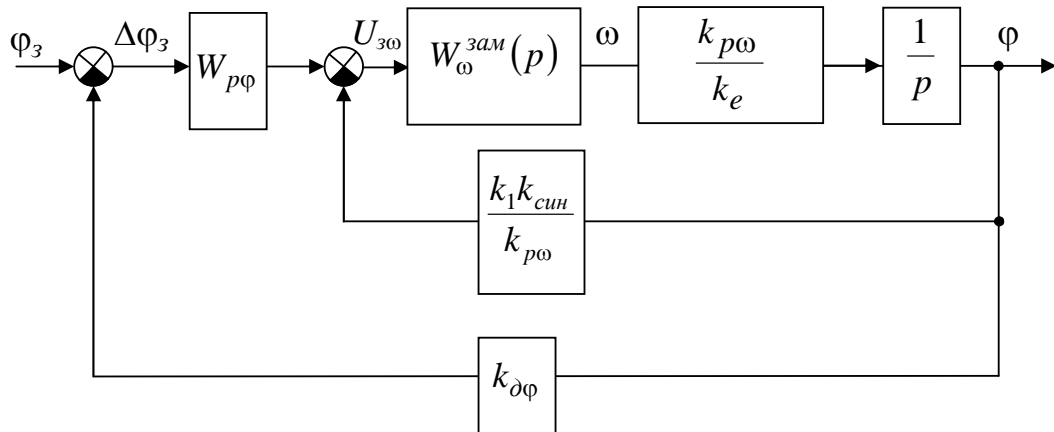


Рис.5.6. Налаштування параметрів контуру синхронізації і регулятора положення

Переносимо внутрішній зворотний зв'язок на зовнішній суматор і об'єднуємо зворотні зв'язки. Враховуючи, що передаточна функція замкнутого контуру швидкості визначається за формулою (5.21), спростуємо

її і отримуємо передаточну функцію розімкненого контуру положення з урахуванням формули (5.24) і $W_{p\varphi}(p) = k_{p\varphi}$ у вигляді

$$W_{\varphi}^{poz}(p) = \frac{(k_{син} + k_{\Delta\varphi} k_{p\varphi}) / k_{p\omega}}{\left[1 + \left(\frac{1}{k_{p\omega} A} \right) p \right] p}. \quad (5.25)$$

Частота зрізу контуру

$$\omega_{с\varphi} = A(k_{син} + k_{\Delta\varphi} k_{p\varphi}) k_{p\omega}. \quad (5.26)$$

Беручи до уваги, що для технічного оптимуму

$$\omega_{с\varphi}^{opt} = \frac{1}{2T_{\mu\varphi}} = \frac{1}{4T_{\mu\omega}}, \quad (5.27)$$

порівнюємо формули (5.26) і (5.27). При цьому враховуємо, що $k_{p\omega}$ знаходиться за формулою (4.10), а $k_{p\varphi}$ – за формулою (5.17). Таким чином знаходиться коефіцієнт підсилення регулятора синхронізації $k_{син}$.

Схема синхронізації (рис.5.3) вимагає регулювання регулятора швидкості у бік зменшення його коефіцієнту підсилення, що призводить до затягування перехідного процесу, а також збільшення коефіцієнту підсилення регулятора положення у порівнянні із технічним оптимумом. Схема електричної синхронізації (рис. 5.7) позбавлена цього недоліку.

Пріоритет каналу синхронізації над каналом переміщення забезпечується великим коефіцієнтом підсилення регуляторів положення. При подачі сигналу завдання на переміщення φ_z з посту керування або ЕОМ, а також сигналу завдання перекосу (розузгодження положень) $\Delta\varphi_z$ на входи регуляторів положення, за рахунок їх великих коефіцієнтів підсилення насичаються регулятори швидкості. Через різні чинники може існувати розузгодженість у статичному навантаженні електроприводів, що призводить до відповідної розузгодженості у їх швидкості і положенні. Сигнал розузгодженості $\Delta\varphi$ надходить на входи регуляторів положення з протилежними знаками. Поки сигнал розузгодження за положенням $\Delta\varphi$ не досягне значення заданого перекосу $\Delta\varphi_z$, до тих пір регулятори швидкості будуть у насиченні і не будуть реагувати на зміну $\Delta\varphi$. При досягненні приблизного рівняння $\Delta\varphi \approx \Delta\varphi_z$ регулятор швидкості, на якому зменшується вхідний сигнал через дію сигналу $\Delta\varphi$ на вході регулятора положення, виходить з насичення і відпрацьовує зміну кутової швидкості, яка виникла через різне статичне навантаження електроприводів.

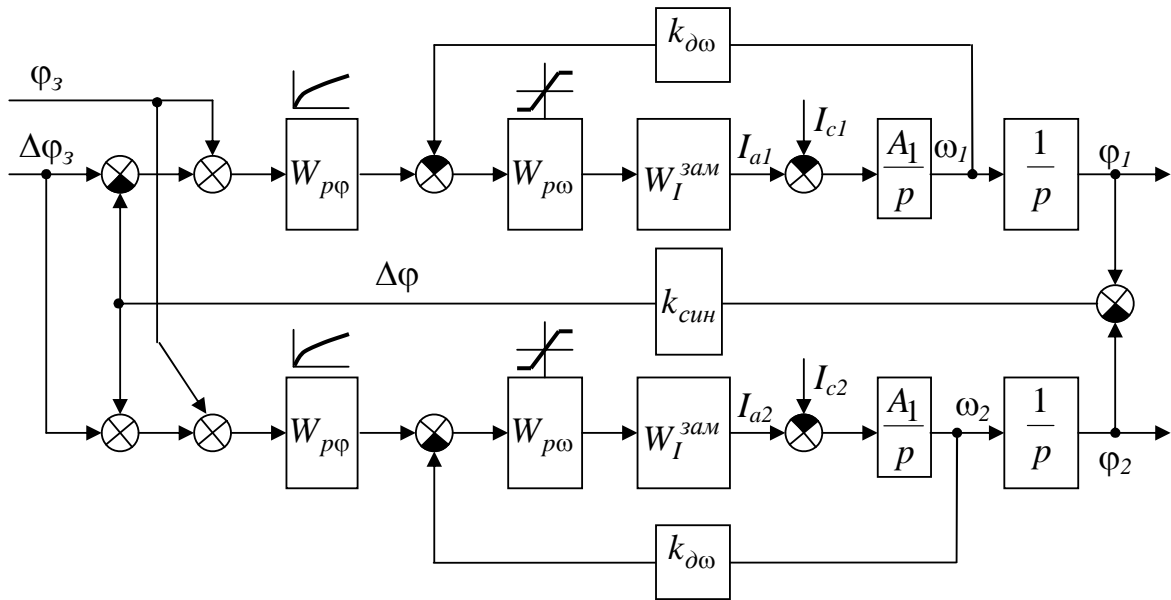


Рис.5.7. Система синхронізації положення з корекцією на вході регуляторів положення

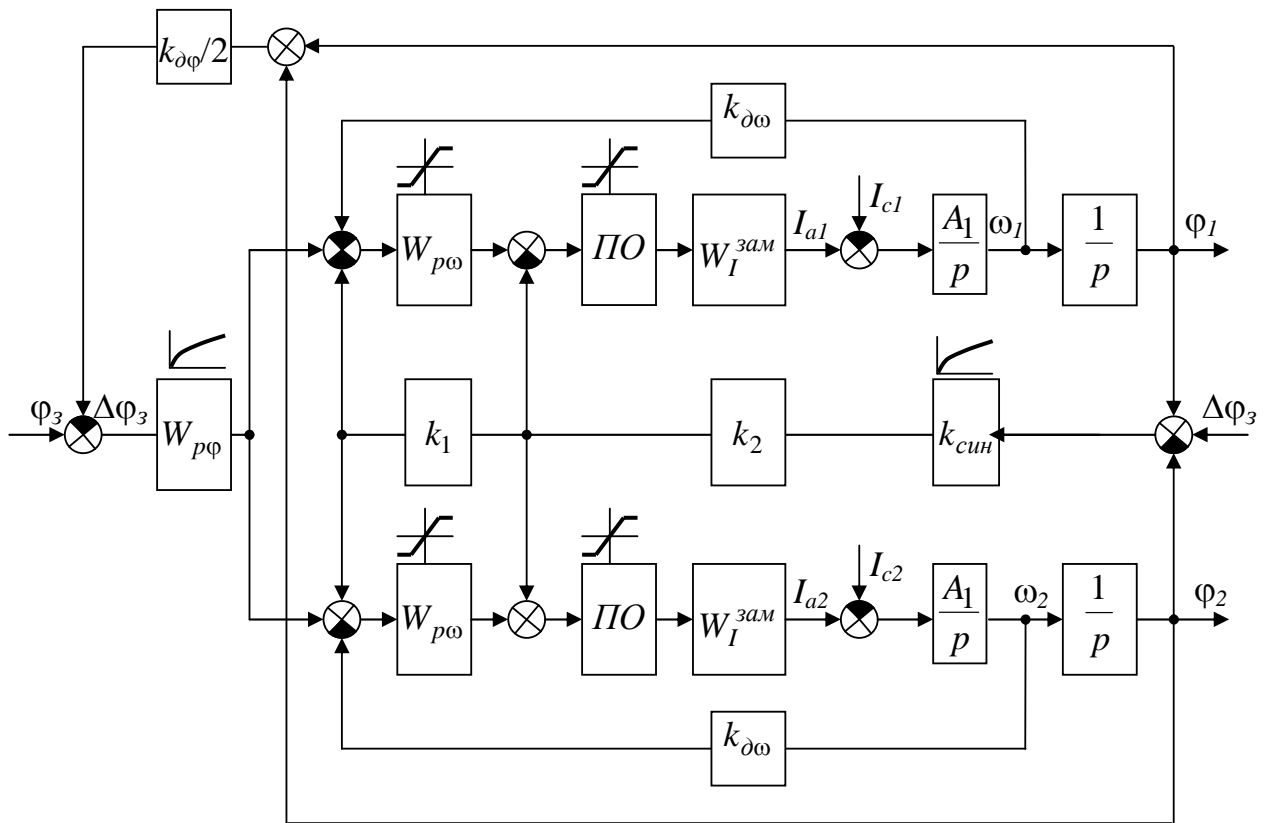


Рис.5.8. Система синхронізації положення з корекцією на вході регуляторів швидкості і струму

В режимі сталої швидкості працюють контури швидкості, підтримуючи швидкості електроприводів на заданому рівні.

У режимі малих швидкостей контур синхронізації стає підпорядкованим до контуру швидкості. Через те, що контур швидкості замкнений, його коефіцієнт підсилення стає менше і збільшується запізнення у відпрацюванні сигналу розузгодженості $\Delta\varphi$.

Перевагою системи (рис.5.7) є її простота у реалізації і налагодженні. Регулятор синхронізації із коефіцієнтом підсилення $k_{син}$ є підсилювачем, який виконує операцію алгебраїчного підсумовування сигналів φ_1 і φ_2 . Тому, з урахуванням рівняння для передаточної функції розімкненого контуру положення, аналогічного (5.5), можемо записати

$$k_{син} \cdot k_{рф} = \frac{1}{2T_{цф}} \cdot \frac{k_{\partial\omega}}{k_{\partial\varphi}}. \quad (5.28)$$

При вибраному коефіцієнті підсилення регулятора положення $k_{рф}$ за формулою (5.28) визначається коефіцієнт підсилення $k_{син}$ регулятора синхронізації. Якщо регулятор положення настроюється на технічний оптимум, то $k_{син} = 1$.

Недоліком розглянутої схеми синхронізації є накопичення похибки синхронізації на малих швидкостях.

Система синхронізації (рис. 5.8) виконана без тих недоліків, які мають системи (рис. 5.3) і (рис.5.7).

За рахунок того, що k_2 (рис. 5.8) малий, вплив контуру синхронізації на контур швидкості при ненасиченому регуляторі швидкості незначний. Однак k_1 великий, тому навіть незначний сигнал розузгодження за положенням призводить до насичення регулятора швидкості і розімкнення контуру швидкості. Працює тільки контур синхронізації.

У випадку, коли регулятор швидкості не насичений ($\Delta\varphi \approx \Delta\varphi_3$, або малі швидкості переміщення). через підсилювач k_2 уводиться корекція за струмом для усунення похибки синхронізації.

Якщо обмеження регулятора швидкості і ПО (рис. 5.8) рівні, тоді у режимі спільного переміщення сигнал похибки через контур синхронізації впливає на зниження частоти одного двигуна. Якщо рівень обмеження ПО вищий, ніж у регулятора швидкості, тоді регулювання виконуватися за рахунок впливу на обидва двигуна.

Розглянемо систему у режимі малих переміщень. Виконаємо перетворення однієї гілки схеми (рис.5.8) шляхом переносу зворотного зв'язку контуру синхронізації перед ланкою k_1 на вхід регулятора швидкості із коефіцієнтом підсилення $k_{р\omega}$, згортання замкнутого зворотним зв'язком $k_{\partial\omega}$ контуру швидкості, вважаючи коефіцієнт підсилення ПО рівним одиниці (рис. 5.9). Коефіцієнт $k_{син}$ при цьому представляє собою нелінійний коефі-

цієнт регулятора синхронізації, що визначає залежність кутової швидкості від кутового переміщення при постійному прискоренні.

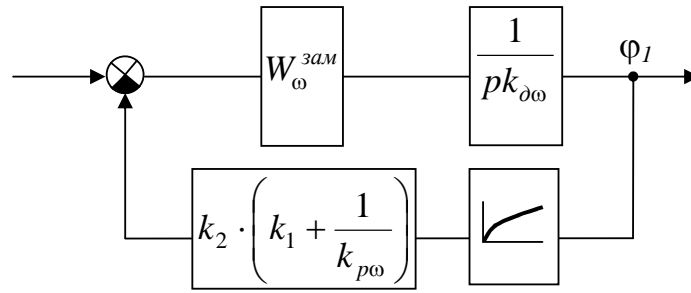


Рис.5.9. Структурні перетворення однієї гілки схеми (рис. 5.5)

Згортаємо структурну схему (рис. 5.9) і отримуємо передаточну функцію замкненого контуру положення $W_{\varphi}^{зам}(p)$.

$$W_{\varphi}^{зам}(p) \approx \frac{k_2(1 + k_1 k_{p\omega}) / (2T_{\mu\omega} k_{d\omega} k_{p\omega})}{p^2 + p \left(\frac{1}{2T_{\mu\omega}} \right) + k_2(1 + k_1 k_{p\omega}) / (2T_{\mu\omega} k_{d\omega} k_{p\omega})}. \quad (5.29)$$

Оптимізований за технічним оптимумом замкнений контур швидкості має передаточну функцію

$$W_{\varphi,опт}(p) = \frac{\omega_{сф}^2}{p^2 + (2\xi_{\varphi} \omega_{сф})p + \omega_{сф}^2}, \quad (5.30)$$

де $\xi_{\varphi} = \sqrt{2}/2$ – коефіцієнт демпфування контуру положення, $\omega_{сф}$ – частота особистих коливань контуру швидкості, $\omega_{сф}^2 = 1/(8T_{\mu\varphi}^2)$, $T_{\mu\varphi} = 2T_{\mu\omega}$ для технічного оптимума.

Порівнюючи коефіцієнти членів характеристичного рівняння у формулах (5.29) і (5.30), знаходимо

$$\frac{k_2}{k_{d\omega}} \cdot \left(k_1 + \frac{1}{k_{p\omega}} \right) = \frac{1}{4T_{\mu\varphi}}. \quad (5.31)$$

Для знаходження k_1 приймаємо $k_2 = 1$, а $k_{p\omega}$ отримуємо за формулою (4.10).

Контрольні запитання

1. Основні принципи будування систем керування положенням. Точна зупинка електропривода.
2. Автоматичне регулювання положення за відхиленням. Режими переміщень. Синтез лінійного регулятора положення.
3. Параболічний регулятор положення. Синтез регулятора.
4. Параболічний регулятор положення. Синтез регулятора з зоною нечутливості.
5. Системи електричної синхронізації положення з корекцією на вході регуляторів струму. Принципи роботи, синтез регулятора синхронізації.
6. Система синхронізації положення з корекцією на вході регуляторів положення. Принципи роботи, синтез регулятора синхронізації.
7. Система синхронізації положення з корекцією на вході регуляторів швидкості і струму. Принципи роботи, синтез регулятора синхронізації.



ВЕНТИЛЬНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД З РЕГУЛЮВАННЯМ НАТЯГУ

6.1. Принципи регулювання натягу

Існує певний клас механізмів, в яких важливо підтримувати постійний натяг того матеріалу, який транспортується. Регулювання натягу використовується у механізмах, що транспортують смуговий матеріал за допомогою натяжних барабанів (роликів) і мають постійний радіус натягування, а також у намотувально-змотувальних механізмах (моталках) зі змінним радіусом рулону. Регулювання натягу необхідно для забезпечення необхідної якості і товщини матеріалу (метал, поліамідна стрічка і т.і.), якості змотування рулону, зниження числа обриву смуги.

Системи керування електроприводів механізмів, для яких вимагається регулювання натягу, зазвичай мають два режими роботи: 1) режим регулювання швидкості двигуна для заправлення смуги, транспортування її без натягу (допоміжний режим); 2) режим регулювання натягу, який повинний забезпечити точну підтримку натягу 3...10 % (у деяких випадках – до 1 %) при діапазоні регулювання натягу 1:10 і більше (основний режим роботи).

Принципово системи регулювання натягу можуть виконуватися як з безпосереднім виміром натягу, так і з виміром і регулюванням непрямих параметрів.

Система регулювання натягу з безпосереднім виміром натягу не одержали широкого поширення через труднощі створення надійних і точних датчиків натягу. Тому в більшості випадків використовується непрямі параметри, а сигнал вимірника натягу, якщо такий є, використовується для корекції системи.

У якості електропривода згаданих механізмів використовується, зазвичай, електропривод постійного струму. Рівняння якірного кола двигуна постійного струму у сталому режимі (електромагнітні перехідні процеси закінчились) виглядає так

$$U_a = E_{\text{дв}} + I_a R_a, \quad (6.1)$$

З (6.1) впливає рівняння для електромагнітної потужності

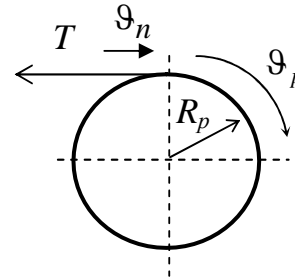
$$U_a I_a = E_{\partial\partial} I_a + I_a^2 R_a, \quad (6.2)$$

де $U_a I_a$ – потужність, що отримується двигуном з мережі, $P_{em} = E_{\partial\partial} I_a$ – електромагнітна потужність, $\Delta P_a = I_a^2 R_a$ – втрати потужності в обмотках якоря двигуна, $E_{\partial\partial} = C_e \Phi \omega_{\partial\partial}$ – ЕРС двигуна.

Електромагнітна потужність витрачається на валу двигуна та на втрати у сталі, механічні та додаткові втрати.

Потужність на валу двигуна визначається через параметри лінійного руху барабана намотувально-розмотувального механізму (рис.6.1)

$$P_{\partial} = \frac{P_{em}}{\eta} = T \cdot \vartheta_n, \quad (6.3)$$



де T – лінійне зусилля на барабані, ϑ_n – лінійна швидкість прокатки, η – ККД двигуна.

Умовою якісної прокатки є сталість натягу у міжклітьовому проміжку і на кінцях матеріалу, що прокатується.

Для того, щоб лінійне зусилля натягу T дорівнювало заданому, повинна виконуватися умова рівності лінійних швидкостей прокатки ϑ_n і рулону ϑ_p . Кутова швидкість двигуна при цьому дорівнюватиме

$$\omega_{\partial\partial} = \frac{\vartheta_p \cdot i_p}{R_p}, \quad (6.4)$$

де i_p – передаточне число редуктора, R_p – радіус рулону.

З формули (6.4) видно, що при заданому значенні ϑ_p діапазон регулювання швидкості двигуна дорівнює діапазону зміни радіусу рулону.

З урахуванням формул (6.1)...(6.4) і нехтуючи постійними втратами у двигуні можна отримати

$$T = \frac{C_e \cdot \Phi \cdot I_a \cdot i_p}{R_p}. \quad (6.5)$$

З умови $T = const$ і формул (6.3) та (6.5) випливають наступні закони непрямого керування електроприводом намотувально-розмотувальних та натяжних механізмів:

- 1) натяжні механізми ($R_p = const$) – $\Phi = const$, $I_a = const$;
- 2) моталки ($R_p = var$) $P_{\partial} = const$;

3) моталки ($R_p = var$) $\Phi = const, I_a/R_p = const$;

4) моталки ($R_p = var$) $I_a = const, \Phi/R_p = const$.

Системи регулювання натягу за законом $\Phi = const, I_a = const$ при $R_p = const$ називаються *системами регулювання натягу і швидкості*.

Регулювання натягу при $R_p = var$ забезпечуються *системами регулювання потужності*. Для регулювання натягу у таких системах згідно з формулою (6.3) необхідний датчик потужності на валу двигуна. Але, як видно з формули (6.2), прямим чином можна виділити тільки електромагнітну потужність шляхом заміру напруги та струму якоря двигуна. При цьому ККД із зміною струму якоря теж змінюється. Таким чином, для точного підтримування натягу слід вимірювати потужність на валу двигуна P_g , що є достатньо складним процесом. Тому спосіб прямого вимірювання потужності тепер не використовується.

Системи з регулювання за законом $\Phi = const, I_a/R_p = const$, або $I_a = const, \Phi/R_p = const$ називаються *системами однозонного регулювання натягу*.

Якщо зміна кутової швидкості двигуна намотувально-розмотувального механізму від максимальної до номінальної виконується за законом $I_a = const, \Phi/R_p = const$, а нижче номінальної – за законом $\Phi = const, I_a/R_p = const$, то системи регулювання натягу, які забезпечують вказані закони, називаються *системами двозонного регулювання натягу, або комбінованими*.

6.2. Моменти на валу електропривода натяжних механізмів

Структурна схема об'єкту регулювання натягу. Структурна схема впливає з наступної системи рівнянь

$$T = f_T(\vartheta_p - \vartheta_n), \quad (6.6)$$

$$\vartheta_p i_p = \omega_{\partial\vartheta} \cdot R_p, \quad (6.7)$$

$$M_c \cdot i_p = R_p \cdot T, \quad (6.8)$$

$$M_{\partial\vartheta} - M_c - M_{c,\partial\partial\partial} = J'_\Sigma \cdot \frac{d\omega_{\partial\vartheta}}{dt}, \quad (6.9)$$

$$M_{\partial\vartheta} = C_M \cdot \Phi \cdot I_a, \quad (6.10)$$

де f_T – нелінійна функція від різниці швидкостей $\vartheta_p - \vartheta_n$, M_c – статичний корисний момент на валу двигуна, $M_{c, \text{доод}}$ – додатковий статичний момент, J'_Σ – незмінний сумарний момент інерції системи електропривода, приведений до валу двигуна, C_M – конструктивний коефіцієнт двигуна. Системі рівнянь (6.6)...(6.10) відповідає рис. 6.2.

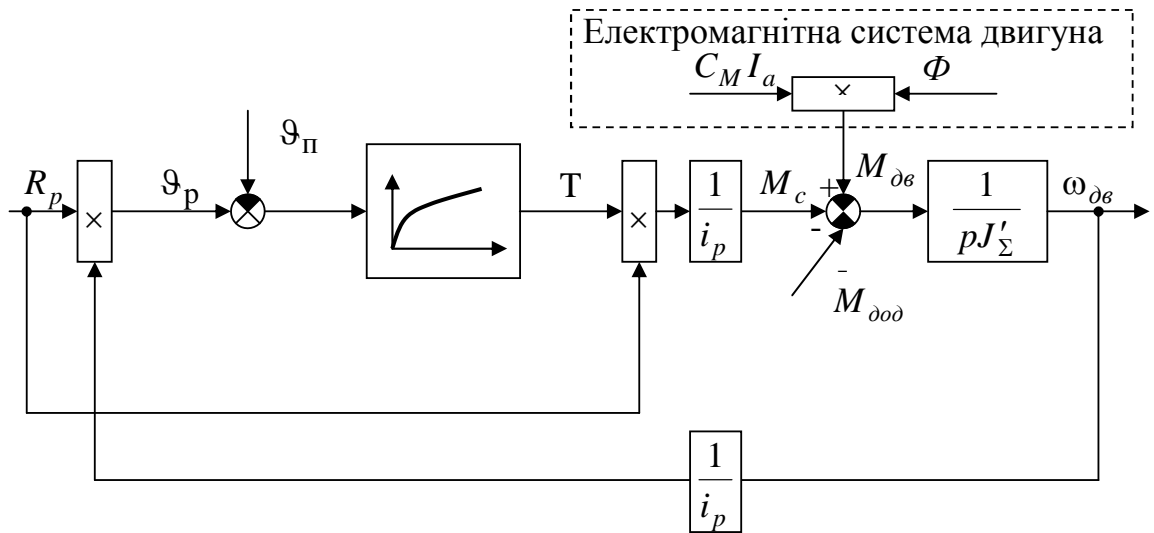


Рис.6.2. Структурна схема об'єкта регулювання натягу

Якщо різниця у лінійних швидкостях $\vartheta_p - \vartheta_n$ невелика, то функція f_T є лінійною, а формула (6.6) відповідає закону Гука.

Для компенсації залежності приведеного до валу двигуна сумарного моменту інерції J_Σ від радіусу ролону R_p , втрат у системі регулювання, моменту деформації вигину смуги при намотуванні у структурній схемі додається додатковий момент двигуна $M_{\text{доод}}$. Для визначення складової $M_{\text{доод}}$ розглянемо моменти на валу двигуна намотувально-розмотувального механізму.

Моменти на валу двигуна намотувально-розмотувального механізму. Сумарний момент на валу двигуна моталки в динаміці має окремі складові

$$M_{\text{дв}} = M_c + M_{\text{вт}} + M_{\text{деф}} + M_{\text{дин}} + M_e, \quad (6.11)$$

де $M_c = \frac{T \cdot R_p}{i_p}$ – статичний корисний момент на валу двигуна, $M_{\text{вт}}$ – момент на подолання втрат в системі регулювання, $M_{\text{деф}}$ – момент деформації вигину смуги при намотуванні, $M_{\text{дин}}$ – динамічний момент, обумовлений розгоном і гальмуванням моталки, M_e – динамічна складова моменту

двигуна, яка компенсує похибку за швидкістю, викликану впливом ЕРС двигуна.

Таким чином, додатковий статичний момент $M_{c,\delta od}$ визначається як

$$M_{\delta od} = M_{\epsilon t} + M_{\delta \epsilon \phi} + M_{\delta un} + M_e. \quad (6.12)$$

Розглянемо складові моменту двигуна окремо.

Динамічний момент з урахуванням формули (6.4) визначається як

$$M_{\delta un} = J_{\Sigma} \frac{d\omega_{\delta \epsilon}}{dt} = M_{\delta un1} + M_{\delta un2}, \quad (6.13)$$

$$\text{де } M_{\delta un1} = \frac{d\vartheta_p}{dt} \cdot \left(\frac{J_{\Sigma} i_p}{R_p} \right), \quad M_{\delta un2} = -\frac{dR_p}{dt} \cdot \left(\frac{J_{\Sigma} \vartheta_p i_p}{R_p^2} \right).$$

Як видно з формули (6.13), складова динамічного моменту $M_{\delta un1}$ визначається похідною лінійної швидкості рулону, а складова $M_{\delta un2}$ пов'язана із зміною радіусу рулону R_p . Якщо товщина смуги, що намотується, мала, то радіус рулону змінюється повільно і швидкість зміни радіусу рулону dR_p/dt теж мала. Тоді складовою $M_{\delta un2}$ можна знехтувати.

Зміна радіусу рулону призводить до зміни моменту інерції системи “намотувально-розмотувальний механізм – електропривод” J_{Σ} . Момент інерції цієї системи має постійну складову і складову, пов'язану із залежністю приведенного до валу двигуна сумарного моменту інерції J_{Σ} від радіусу рулону R_p

$$J_{\Sigma} = J'_{\Sigma} + J''_{\Sigma}, \quad (6.14)$$

де J'_{Σ} – незмінний сумарний момент інерції обертових частин електропривода;

$J''_{\Sigma} = \frac{m \cdot (R_p^2 - R_{p0}^2)}{2 \cdot i_p^2}$ – складова приведенного до валу двигуна сумарного моменту інерції, яка пов'язана із зміною радіусу рулону R_p ,

$m = \pi \cdot (R_p^2 - R_{p0}^2) \cdot B \cdot \gamma$ – маса матеріалу в рулоні, B – ширина смуги, γ – питома вага матеріалу.

Існує певний зв'язок між радіусом рулону R_p і лінійною швидкістю рулону ϑ_p через поточний об'єм рулону Q_{pt} . Поточне значення об'єму визначається через параметри рулону – ширину смуги B , товщину смуги h і її поточну довжину l_t .

Поточне значення довжини l_t є інтегральною характеристикою лінійної швидкості рулону $l_t = \int_0^t \vartheta_p dt$. Тому

$$Q_{pt} = B \cdot h \cdot l = B \cdot h \cdot \int_0^t \vartheta_p dt. \quad (6.15)$$

З іншого боку, визначаючи об'єм через масу (див. формулу (6.14)), маємо

$$Q_{pt} = \frac{m}{\gamma} = \pi \cdot (R_p^2 - R_{p0}^2) \cdot B. \quad (6.16)$$

Порівнюючи формули (6.15) і (6.16), можна отримати значення радіусу рулону

$$R_p = \sqrt{\frac{h}{\pi} \int_0^t \vartheta_p dt + R_{p0}^2}. \quad (6.17)$$

Похідна від виразу (6.17) дозволяє визначити складову динамічного моменту $M_{дин2}$

$$\frac{dR_p}{dt} = \frac{h\vartheta_p}{2\pi \sqrt{\frac{h}{\pi} \int_0^t \vartheta_p dt + R_{p0}^2}} = \frac{h\vartheta_p}{2\pi R_p}. \quad (6.18)$$

Таким чином, вирази (6.14)...(6.18) дозволяють при відомих R_{p0} , h , B , γ та заданому законі зміни швидкості у часі розрахувати залежності зміни радіусу рулону, моменту інерції і динамічних моментів від часу.

6.3. Система регулювання натягу й швидкості натяжних механізмів

Як було сказано раніше, транспортування смугового матеріалу забезпечується за допомогою натяжних барабанів (роликів), які мають постійний радіус натягування $R_p = const$. Законом керування електроприводом натяжних механізмів є стабілізація потоку та струму якоря двигуна: $\Phi = const$, $I_a = const$. При цьому система керування електроприводом натяжних механізмів повинна працювати у двох режимах:

- режим регулювання швидкості;
- режим регулювання натягу.

В режимі регулювання швидкості схема системи керування електроприводом натяжних механізмів аналогічна двоконтурній схемі з підпорядкованим регулюванням параметрів.

В режимі регулювання натягу слід відрізнити режими стабілізації натягу у режимі двигуна та режимі гальмування.

Сталість потоку забезпечується відповідною системою стабілізації струму збудження двигуна. Тому основною задачею регулювання натягу в електроприводі натяжних механізмів є стабілізація струму якоря у перехідних та сталих режимах. При цьому повним сигналом завдання на струм повинний бути сигнал $I_{\Sigma,3}$, який враховує усі складові струму, що є функцією кутової швидкості двигуна, лінійної швидкості смуги, сумарного моменту системи електропривода і т.і. (у відповідності із складовими моментами на валу двигуна, визначеному за формулою (6.11)).

Для забезпечення стабілізації струму якоря у режимі двигуна необхідно, щоб контур швидкості був розімкнений. Тому завдання $I_{\Sigma,3}$ у режимі двигуна є рівнем обмеження регулятора швидкості (рис. 6.3).

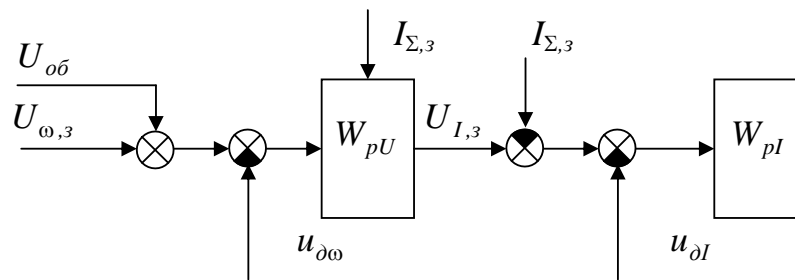


Рис. 6.3. Фрагмент системи регулювання швидкості і натягу натяжних механізмів

В режимі двигуна завдання на швидкість на вході регулятора швидкості визначається сумою сигналів завдання $U_{\omega,3}$ та $U_{об}$. Складова завдання на швидкість $U_{\omega,3}$ формується із декілька складових, які враховують деякі параметри швидкісного режиму прокатки (швидкість прокатки, необхідну силу натягу, розмір петлі та ін.). Складова завдання $U_{об}$ називається завданням на швидкість обгону. Вона уводить регулятор швидкості у режим насичення (рис.6.4). Ця складова необхідна для обмеження швидкості смуги в умовах її обриву.

Якщо в одному з режимів (двигуна або гальмування) виникне обрив смуги, то двигун, не маючи опору, почне розганятися. При цьому сигнал зворотного зв'язку із швидкості $u_{\Delta\omega}$ збільшується і виводить регулятор швидкості з насичення (рис.6.4). Перевищення

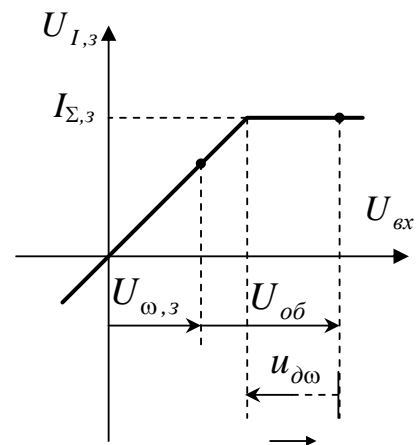


Рис. 6.4. Регульоване обмеження вихідного сигналу регулятора швидкості

швидкості обмежується величиною $\mathfrak{Q}_{об}$. У сигналах системи керування це обмеження має вигляд

$$|U_{\omega,з} - u_{\partial\omega}| = U_{об}. \quad (6.19)$$

Якщо прийняти, що завданням на швидкість буде швидкість прокатки \mathfrak{Q}_n , а сигналу зворотного зв'язку по швидкості відповідатиме лінійна швидкість двигуна $(R_p \omega_{\partial\omega})/i_p$, то матимемо лінійну швидкість обгону

$$\left| \mathfrak{Q}_n - \frac{R_p \omega_{\partial\omega}}{i_p} \right| = \mathfrak{Q}_{об}. \quad (6.20)$$

Величина швидкості обгону $\mathfrak{Q}_{об}$ може бути постійною, або бути у залежності від швидкості прокатки, наприклад, $\mathfrak{Q}_{об} = \alpha + \beta |\mathfrak{Q}_n|$.

У режимі гальмування сигнал сумарного статичного струму подається безпосередньо на регулятор струму, забезпечуючи обмеження регулятора швидкості на рівні нуля. У цьому режимі натяжний механізм гальмує смугу, забезпечуючи необхідний натяг.

6.4. Однозонна система регулювання натягу

Однозонна система регулювання натягу використовується для намотувально-розмотувальних механізмів із змінним радіусом рулону ($R_p = var$) і електроприводом малої потужності. Законом керування для такої системи електропривода є стабілізація потоку двигуна ($\Phi = const$) і співвідношення струму якоря до радіусу рулону $I_a/R_p = const$.

Сталість потоку забезпечується відповідною системою стабілізації струму збудження двигуна. При цьому, як видно з формули (6.5), забезпечення $I_a/R_p = const$ автоматично забезпечує стабілізацію сили натягу. ЕРС двигуна у такий спосіб регулювання матиме гіперболічну залежність від радіусу рулону

$$E_{\partial\omega} = C_e \Phi \omega_{\partial\omega} = \frac{C_e \Phi \mathfrak{Q}_n}{R_p} = \frac{k_e \mathfrak{Q}_n}{R_p}. \quad (6.21)$$

Таким чином, при зміні радіусу рулону з мінімального R_{p0} до максимального R_{pk} необхідне одночасне пропорційне збільшення струму якоря і параболічного зменшення ЕРС двигуна (рис.6.5).

У масиві графіків на (рис.6.5) більшому значенню сили натягу відповідає вище розташування ліній.

Як видно з рис.6.5, більшу частину часу двигун працює з підвищеним струмом якоря, що призводить до збільшення втрат у двигуні і його пере-

гріву. Крім того, при зниженій швидкості прокатки необхідне зниження напруги перетворювача, що живить двигун, тобто двигун повністю за напругою не використовується.

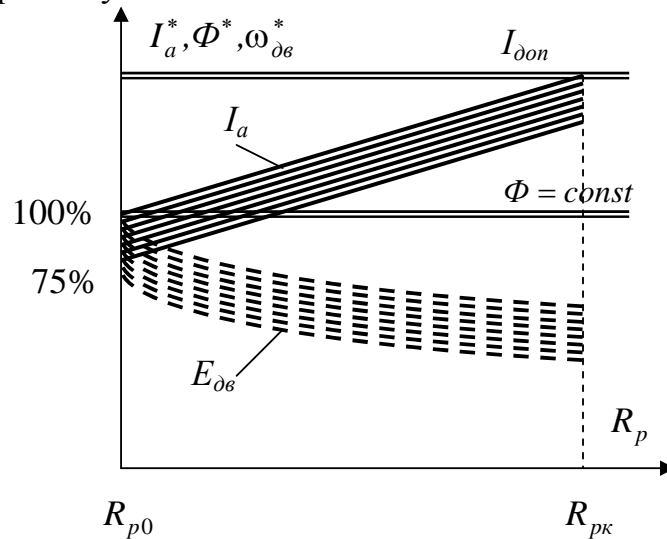


Рис.6.5. Діаграми регулювання струму якоря і ЕРС двигуна у залежності від радіуса рулону

Система автоматичного регулювання електроприводом за представлених умов будується за принципом регулювання струму якоря (рис.6.6). На вхід регулятора струму якоря подається сигнал завдання на початкове значення ЕРС двигуна, яке, у відповідності з формулою (6.21), є еквівалентом завдання на лінійну швидкість прокатки ϑ_n при початковому значенні радіусу рулону R_{p0} . На вході регулятора сигнал завдання порівнюється із сигналом зворотного зв'язку за ЕРС двигуна. Так забезпечується стабілізація цього параметру.

Із збільшенням радіусу рулону R_p зростає лінійна швидкість рулону. Через те, що сила натягу пропорційна різниці швидкостей $\vartheta_p - \vartheta_n$, сила натягу та статичний момент на валу двигуна також збільшується (рис. 6.6). При цьому кутова швидкість двигуна зменшується, що веде до зниження його ЕРС. Це призводить до зростання різниці між напругою живлення двигуна та його ЕРС і, відповідно, збільшення струму якоря. Тому момент двигуна підвищується і компенсує зростання статичного моменту. Так встановлюється відповідність між радіусом рулону та струмом якоря і забезпечується сталість співвідношення I_a/R_p .

На регулятор також заводиться сигнал, пропорційний поточному значенню струму якоря. Зворотний зв'язок за струмом якоря призначений для збільшення швидкодії контуру струму шляхом компенсації відповідної електромагнітної сталої часу.

Налагодження регулятора струму виконується за формулою (3.1) на частоту зрізу

$$\omega_{cI} = \frac{k_n \left(k_{\partial I} + k_{\partial e} \Phi_n \frac{v_n}{R_{po}} \right) C_M}{T_I R_a}. \quad (6.22)$$

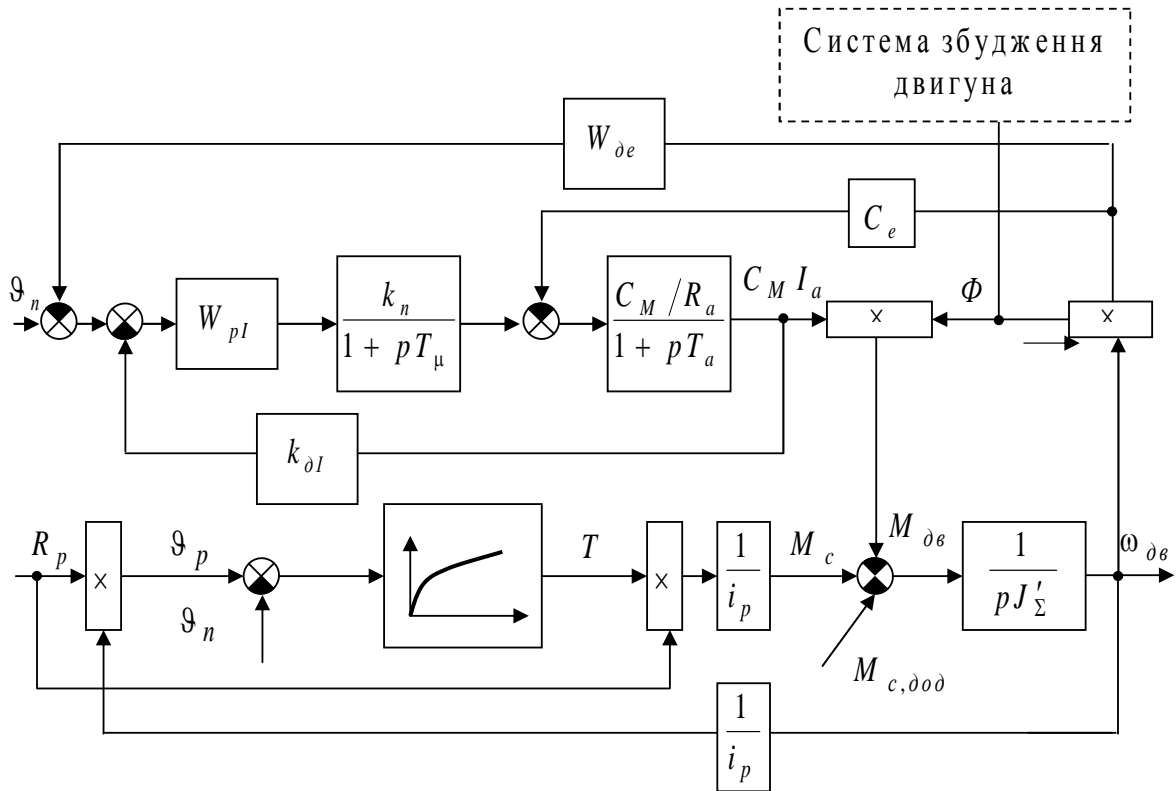


Рис.6.6. Однозонна система регулювання натягу при $T, I_a/R_p = const$

Сигнал ЕРС формується за допомогою сигналів струму й напруги якоря (див. формулу (3.18)). Тому

$$W_{\partial e}(p) = \frac{k_{\partial e}}{1 + pT_a}. \quad (6.23)$$

Стала часу T_a приводиться до некомпенсованої сталої контуру струму T_μ .

6.5. Однозонна система регулювання натягу при змінному потоку

Однозонна система регулювання натягу при змінному потоку використовується для намотувально-розмотувальних механізмів із змінним радіусом ролону ($R_p = var$) і електроприводом середньої потужності. Законом керування для такої системи електропривода є стабілізація струму якоря двигуна ($I_a = const$) і співвідношення потоку збудження до радіусу ролону $\Phi/R_p = const$. Для забезпечення цих умов в системі регулювання електро-

приводом повинно бути два контури. Один контур забезпечує стабілізацію струму якоря, а інший – співвідношення між потоком і радіусом рулону (рис. 6.7). Як видно з формули (6.21), умова $\Phi/R_p = const$ виконується шляхом стабілізації ЕРС двигуна.

При збільшенні радіусу рулону збільшується момент опору двигуна і, тому, зменшується його кутова швидкість. Це призводить до відповідного зменшення сигналу зворотного зв'язку з ЕРС двигуна на регуляторах $W_{pe,1}$ і $W_{pe,2}$. У цей час регулятор $W_{pe,1}$ заведений у насичення сигналом швидкості обгону $\vartheta_{об}$. Тому контур регулювання ЕРС у якірному колі двигуна розімкнений.

На регуляторі $W_{pe,2}$ виконується порівняння сигналу завдання на лінійну швидкість прокатки ϑ_n й поточного сигналу зворотного зв'язку з ЕРС двигуна. Вихідний сигнал регулятора $W_{pe,2}$ є вхідним для контуру регулювання потоку. Контур реагує на збільшення сигналу розузгодження на вході регулятора $W_{pe,2}$ зміною потоку збудження двигуна у бік його підвищення. Таким чином, зниження кутової швидкості двигуна компенсується підвищенням його потоку збудження й ЕРС стабілізується.

У разі розриву смуги навантаження електропривода намотувально-розмотувального механізму миттєво впаде до навантаження неробочого ходу. Одночасно, за рахунок цього зростають кутова швидкість і ЕРС двигуна. Вони будуть зростати до рівня, визначеного сигналом швидкості обгону $\vartheta_{об}$. Після цього регулятор $W_{pe,1}$ вийде з насичення, контур регулювання ЕРС в якірному колі замикається й знижує струм якоря до струму неробочого режиму. Подальше зростання кутової швидкості (ЕРС) вище заданої закінчується, й починається її зменшення до заданого рівня швидкості прокатки. При цьому виникає короткочасний нестійкий режим, коли одночасно замкнуті обидва контури регулювання ЕРС.

САР натягу повинна працювати у всіх режимах – розгону, гальмування та сталому, тому при обмеженні виходу регулятора $W_{pe,1}$ слід враховувати усі складові струму двигуна у вигляді сигналу обмеження $I_{\Sigma,3}$. Крім того, необхідно пам'ятати, що сигнал ЕРС формується за допомогою сигналів струму й напруги якоря (див. формулу (3.18)).

Вибір структури регуляторів САР та їх настроювання виконується за принципом підпорядкованого керування, розглянутого у 3-му та 4-му розділах.

Недоліком САР регулювання натягу при зміні потоку є те, що двигун увесь час працює із зниженим потоком і тому не використовується повністю за перевантажувальною здатністю (рис.6.8) (двигун повинен бути більшої потужності для забезпечення необхідного струму при зниженому потоці збудження).

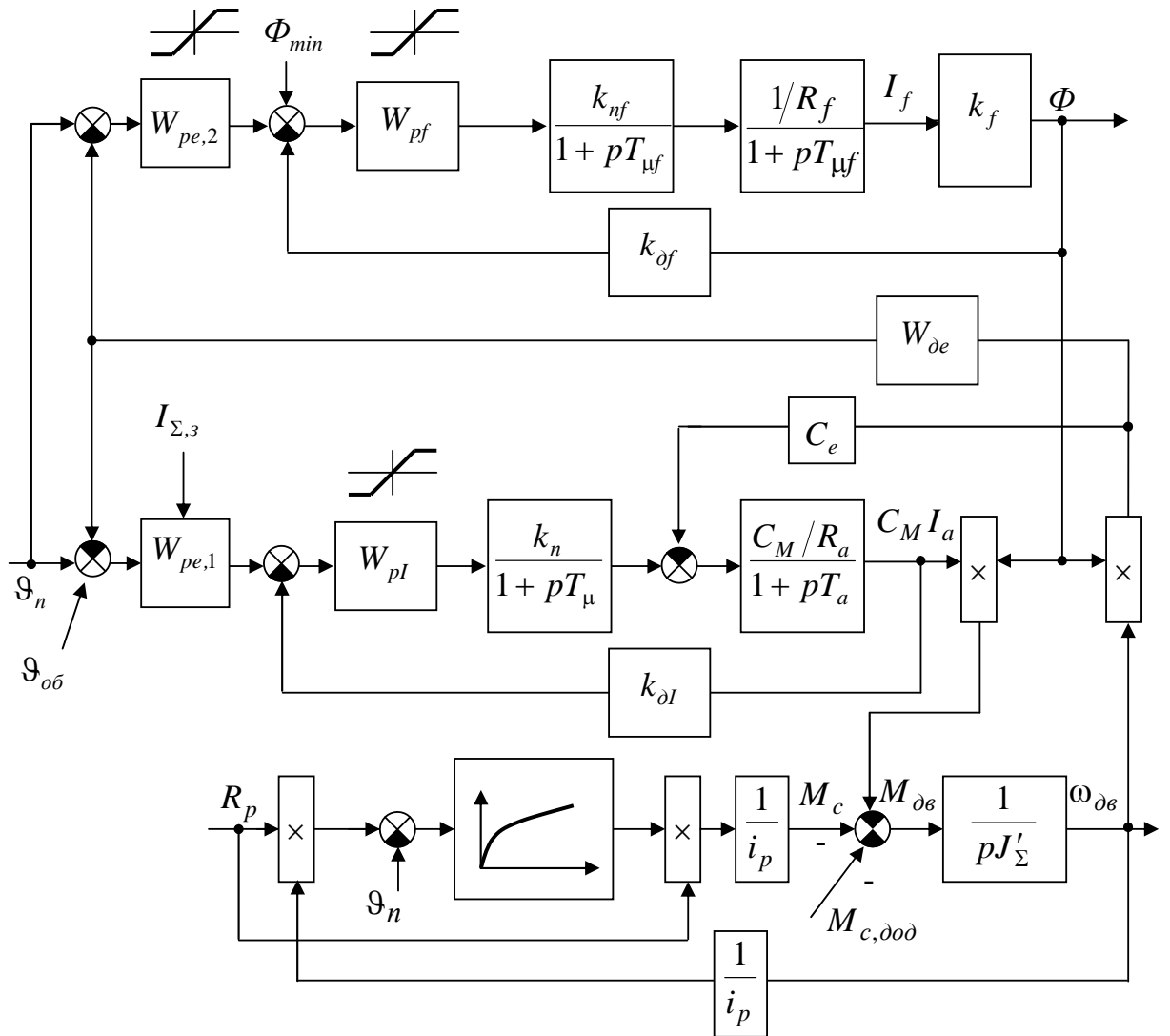


Рис.6.7. Однозонна система регулювання натягу при $I_a = const$, $\Phi/R_p = const$

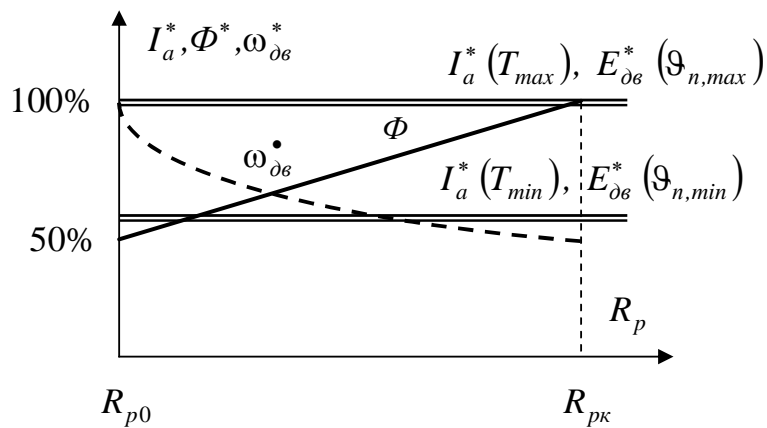


Рис.6.8. Діаграми регулювання потоку збудження і ЕРС двигуна у залежності від радіуса ролону

6.6. Двохзонна система регулювання натягу (комбінована)

Для усунення недоліку попередньої схеми регулювання натягу, коли увесь діапазон швидкості електропривода забезпечується за рахунок зниження потоку, двухзонна система регулювання надає можливість регулювання швидкості як за рахунок регулювання потоку, так і за рахунок регулювання струму якоря двигуна (рис.6.9). Перша зона регулювання дає діапазон $D_1 = \omega_{max}/\omega_n$ зміни кутової швидкості двигуна від максимальної до номінальної. Друга зона – $D_2 = \omega_n/\omega_k$ зміни кутової швидкості двигуна від номінальної до кінцевої (рулон з максимальним радіусом R_{pk}).

У першій зоні забезпечується закон регулювання натягу $I_a = const$, $\Phi/R_p = const$. При цьому потік регулюється в інтервалі $(0,45...1)\Phi_n$. Кутова швидкість змінюється у гіперболічній залежності від радіусу рулону, а ЕРС двигуна є незмінною.

У другому діапазоні регулювання швидкості виконується закон регулювання натягу $\Phi = const$, $I_a/R_p = const$. Потік у цій зоні не змінюється, зростає лінійно струм якоря, а ЕРС і кутова швидкість двигуна зменшуються гіперболічно при збільшенні радіусу рулону.

Діаграми регулювання натягу у двухзонній системі показана на (рис.6.10).

Відміною рисою двухзонної системи регулювання натягу від однозонної за законом регулювання $I_a = const$, $\Phi/R_p = const$ є те, що замість зовнішнього контуру регулювання ЕРС двигуна у двухзонній САР використовується контур регулювання лінійної швидкості рулону \mathfrak{S}_p . Це пов'язане з тим, що у другій зоні двухзонної САР натягу ЕРС змінюється, а лінійна швидкість рулону підтримується в обох зонах на заданому рівні.

Умовою переходу з першої зони в другу є досягнення кутової швидкості двигуна номінального значення ω_n .

У першій зоні регулятор лінійної швидкості рулону $W_{p\mathfrak{S}}$ знаходиться у насиченні за рахунок сигналу обгону $\mathfrak{S}_{об}$. Верхня границя насичення визначається величиною сигналу сумарного струму $I_{\Sigma,3}$. Регулятор вийде з насичення при обриві смуги, коли лінійна швидкість рулону перевищить швидкість прокатки на задану $\mathfrak{S}_{об}$ величину.

При подальшому зменшенні кутової швидкості двигуна, коли вона стає менше номінальної, САР переходить у другу зону регулювання. При цьому потік досягає свого номінального значення і більше не змінюється.

Далі, із зростанням радіусу рулону, збільшення моменту опору смуги призводить до зменшення ЕРС двигуна і, відповідно, до збільшення струму якоря.

Визначення структури регуляторів та розрахунок їх параметрів виконується аналогічно до однозонних САР.

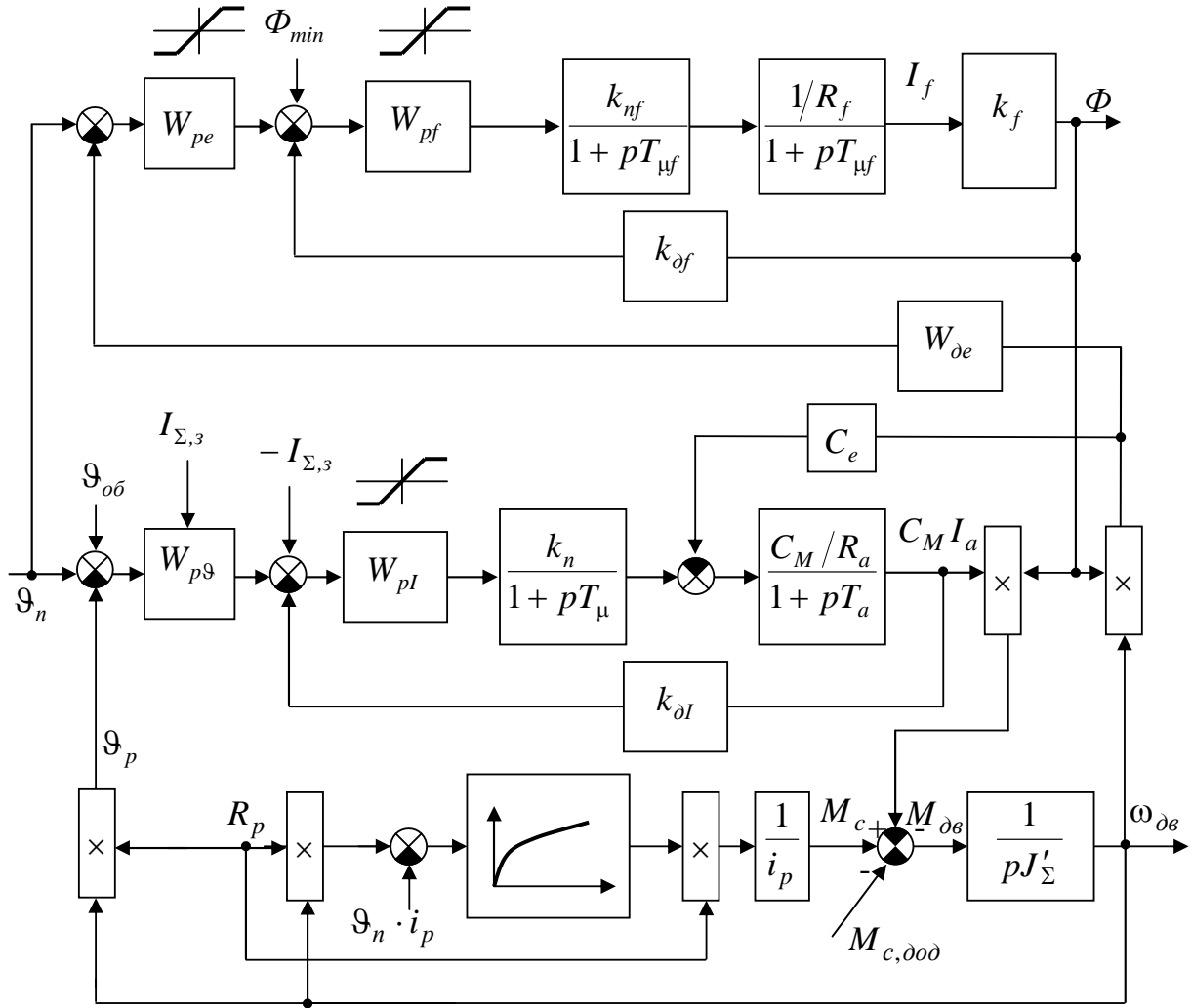


Рис.6.9. Двохзонна система регулювання натягу

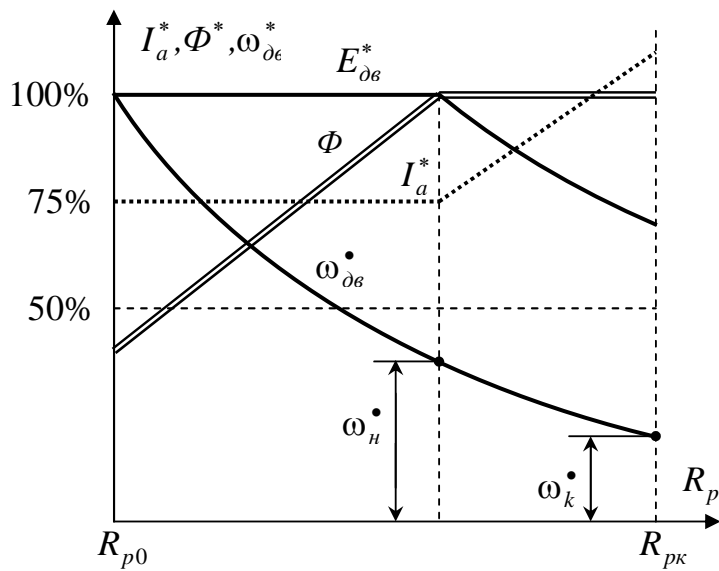


Рис.6.10. Діаграми регулювання натягу у двохзонній САР

Контрольні запитання

1. Принципи регулювання натягу.
2. Структурна схема об'єкту регулювання натягу.
3. Моменти на валу двигуна намотувально-розмотувального механізму.
4. Система регулювання натягу й швидкості натяжних механізмів. Структурна схема, принципи роботи.
5. Однозонна система регулювання натягу при постійному потоку. Структурна схема, принципи роботи, синтез регулятора струму.
6. Однозонна система регулювання натягу при змінному потоку. Структурна схема, принципи роботи, синтез регуляторів.
7. Двохзонна система регулювання натягу (комбінована). Структурна схема, принципи роботи, синтез регуляторів.



АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОКАТНИХ СТАНІВ

7.1. Задачі автоматизації

Метою автоматизації є підвищення якості прокату, економія металу і енергоресурсів за рахунок підвищення продуктивності станів, полегшення праці персоналу, покращання організації і удосконалення управління виробництвом.

З точки зору отримання якісної продукції *основними задачами автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУ ТП) прокати є:* 1) отримання заданої товщини готової продукції; 2) усунення різнотовщинності; 3) отримання металу із заданою структурою.

На якість прокати впливають багато технологічних параметрів, підтримання яких на заданому рівні забезпечується окремими локальними АСУ ТП, які будуються, як правило за ієрархічною функціональною структурою.

Найбільш важливими є системи автоматичного регулювання товщини і натягу смуги (САРТ і Н). Зазвичай система регулювання товщини смуги використовується у поєднанні із системою регулювання натягу смуги. Лише при такому поєднанні вдається отримувати задовільний результат при усуненні різнотовщинності та відхилень товщини від заданої.

Основними причинами різнотовщинності є:

- прокатування початку і кінця заготовки без відповідного переднього та заднього натягу;
- ударне прикладання навантаження при заправці заготовки у кліть (викликає коливання кутової швидкості клітей, що супроводжується коливанням сил натягу у міжклітьовому проміжку).

Основні причини відхилення товщини готової продукції від заданої такі:

- різна початкова товщина металу, який повинен прокатуватися (наприклад, початкова товщина слябінгу коливається у допустимих межах 5...10 мм);
- різні механічні властивості металу через: а) зміна початкової температури металу від зміни температурного режиму печей, що нагрівають; б) зміну температури металу (остигання у межах 10...20°C) у процесі про-

катки; в) зміна в межах допусків хімічного складу металу;

– пружна деформація валків.

Розглянемо основні принципи впливу на товщину металу при прокатці.

7.2. Теоретичні принципи регулювання товщини металу при гарячій прокатці

На товщину металу, що прокатується, впливають наступні причини: а) початкова товщина заготовки; б) механічні властивості металу; в) початковий зазор між валками.

Розглянемо вплив на товщину готового прокату кожного з цих збуджуючих чинників окремо та разом.

Вплив вхідної товщини заготовки H на вихідну товщину прокату h при постійному початковому зазорі між валками S_0 та незмінних механічних властивостях металу. При збільшенні товщини заготовки на ΔH тиск на валки з боку металу збільшиться на ΔP , а товщина готового прокату – на Δh . При цьому здійсниться паралельне зміщення кривої пластичної деформації $P = f(H - h)$ вправо по вісі товщини h (рис.7.1). Робоча точка $A(P_A, h_A)$, отримана як точка перетину лінії пружної деформації валків $P = C \cdot (h - S_0)$, де C – коефіцієнт пружності валків, з кривою пластичної деформації металу $P = f(H - h)$, зміщується у точку $B(P_A + \Delta P, h_A + \Delta h)$. Як видно з рис.7.1, досягти необхідної товщини прокату у випадку підвищення початкової товщини заготовки можна шляхом зменшення зазору між валками на величину ΔS , що призводить до подальшого зростання тиску до рівня P_E .

Для трикутника ABC (рис.7.1) справедливі наступні співвідношення

$$\left. \begin{aligned} BD &= AD \cdot \operatorname{tg} \alpha, \\ BD &= \Delta P = DC \cdot \operatorname{tg} \beta, \\ AD + DC &= AC = \Delta H \cdot \chi, \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

де $\operatorname{tg} \alpha = C$ – коефіцієнт пружності валків;

$\operatorname{tg} \beta = K$ – модуль жорсткості металу у точці C ;

χ – коефіцієнт нелінійності функції $f(H + \Delta H - h) - f(H - h)$.

Із співвідношень (7.1) можна отримати

$$\Delta P = \frac{C \cdot K}{C + K} \cdot \chi \cdot \Delta H, \quad (7.2)$$

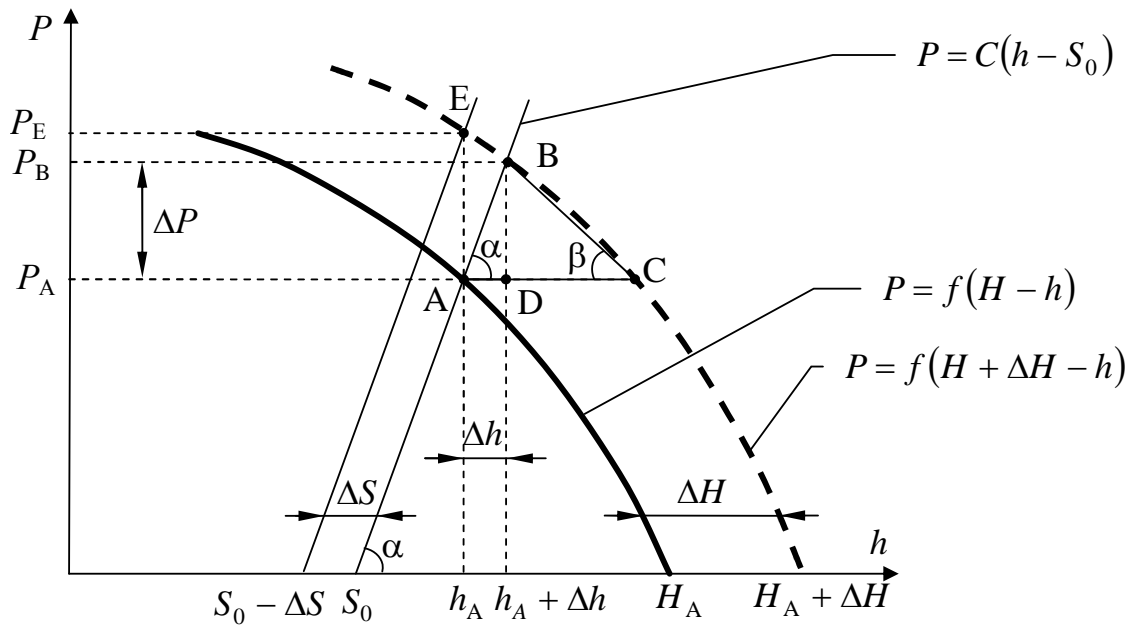


Рис.7.1. Криві пластичної деформації металу при різній початковій товщині заготовки

$$\Delta h = \frac{K}{C + K} \cdot \chi \cdot \Delta H . \quad (7.3)$$

Формули (7.2)...(7.3) отримані з припущення, що дотична до кривої $P = f(H + \Delta H - h)$ у точці C співпадає зі стороною BC трикутника ABC .

Отримані співвідношення показують, на скільки збільшується тиск металу на валки та його вихідна товщина при збільшенні початкової товщини заготовки на ΔH без прийняття заходів щодо зменшення цього впливу на якість готової продукції.

Поділивши формулу (7.3) на формулу (7.2), маємо

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{C} . \quad (7.4)$$

З формули (7.4) випливає, що при прийнятих припущеннях приріст кінцевої товщини прокату визначається пружними властивостями прокатних валків, якщо початковий зазор між валками не змінювався.

Вплив механічних властивостей металу на вихідну товщину прокату h при постійному початковому зазорі між валками S_0 та незмінній початковій товщині заготовки. Зміна пластичних властивостей металу (збільшення жорсткості) характеризується збільшенням коефіцієнта пластичної деформації, що відповідає кривій $P = f'(H - h)$ на рис.7.2.

Визначимо через k відносну зміну пластичних властивостей металу

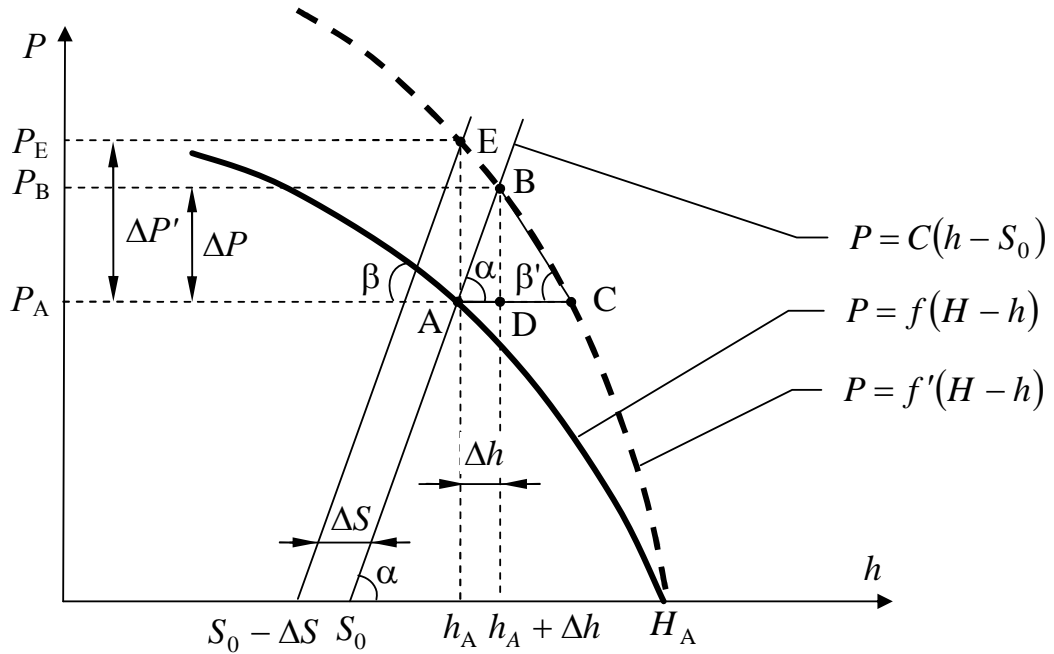


Рис.7.2. Криві пластичної деформації металу при різних механічних властивостях металу заготовки

$$\kappa = \frac{K' - K}{K}, \quad (7.5)$$

де $K' = tg\beta'$.

Компенсація впливу зміни пластичних властивостей металу на вихідну товщину прокату можлива шляхом зменшення зазору між валками. Однак, це призведе до збільшення тиску на валки до рівня P_E (рис.7.2). Приймаючи коефіцієнт пластичної деформації у точках C і E однаковим, отримуємо з трикутника AEC

$$\Delta P' = P_E - P_A = (K' - K) \cdot (H - h) = K \cdot \kappa \cdot (H - h) = \kappa \cdot P_A \quad (7.6)$$

З трикутника ABC , аналогічно до співвідношень (7.1), маємо

$$\Delta P = \frac{C \cdot K'}{C + K'} \cdot AC = \frac{C}{C + K} \cdot \kappa \cdot P_A, \quad (7.7)$$

$$\Delta h = \frac{1}{C + K} \cdot \kappa \cdot P_A, \quad (7.8)$$

де $AC = \frac{AE}{K'} = \frac{\kappa \cdot P_A}{(1 + \kappa) \cdot K}$ з формул (7.5)...(7.6).

Порівнявши формули (7.7) та (7.8) також отримуємо формулу (7.4).

Одновременный влияние начальной толщины заготовки та механических свойств металла на выходную толщину проката h при постоянном начальном зазоре между валками S_0 . В реальных условиях прокатки одновременный влияние указанных факторов є найбільш вірогідним. У цьому випадку крива пластичної деформації металу $P = f'(H + \Delta H - h)$ носить результуючий характер (рис.7.3).

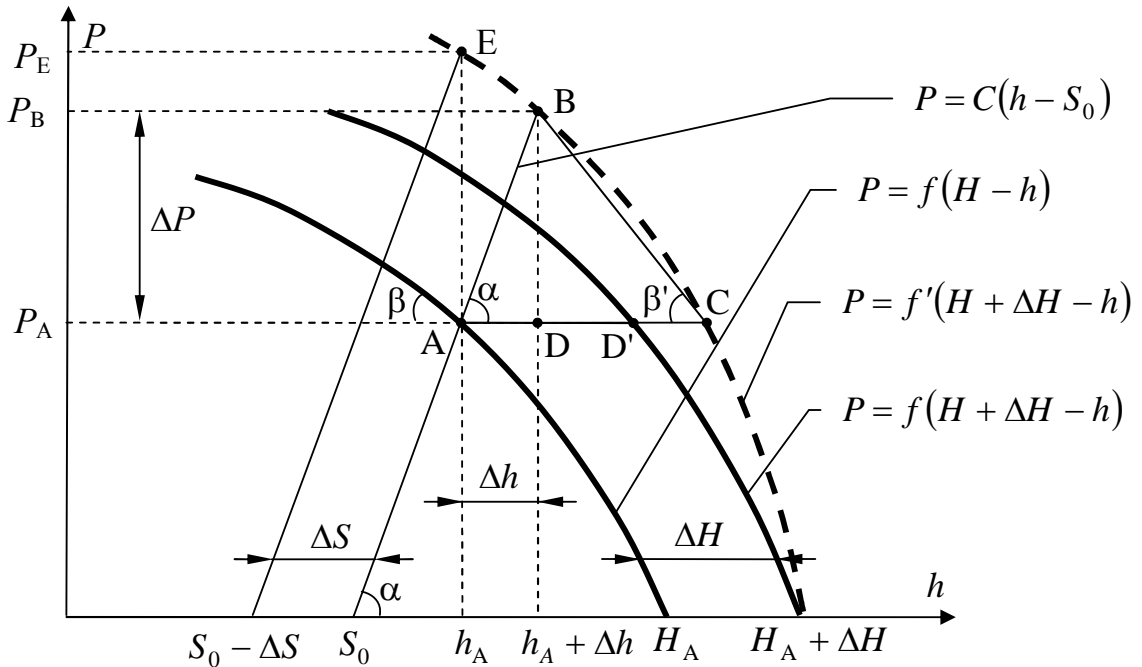


Рис.7.3. Криві пластичної деформації металу при різних початковій товщині та механічних властивостях заготовки

Аналізуючи рис.7.3, робимо висновок, що складова приросту вихідної товщини прокату AD' пов'язана зі збільшенням початкової товщини заготовки, а приріст вихідної товщини прокату $D'C$ – зі зміною пластичних властивостей металу, тобто відрізок AD' (рис.7.3) відповідає відрізку AC (рис.7.1), а відрізок $D'C$ (рис.7.3) відповідає відрізку AC (рис.7.2). Тому $AD' = \chi \cdot \Delta H$,

$$D'C = \frac{\kappa \cdot P_A}{(1 + \kappa) \cdot K}.$$

Аналогічно до попередніх міркувань, з трикутника ABC (рис.7.3) отримуємо з урахуванням $\kappa + 1 \approx 1$

$$\Delta P \approx AC \cdot \frac{C \cdot K'}{C + K'} = \frac{C \cdot K}{C + K} \cdot \left(\chi \cdot \Delta H + \kappa \cdot \frac{P_A}{K} \right), \quad (7.9)$$

$$\Delta h \approx \frac{K}{C + K} \cdot \left(\chi \cdot \Delta H + \kappa \cdot \frac{P_A}{K} \right). \quad (7.10)$$

Тобто

$$\Delta h = \Delta h_{\Delta H} + \Delta h_{\chi}, \quad (7.11)$$

де $\Delta h_{\Delta H} \approx \frac{K}{C+K} \cdot \chi \cdot \Delta H$, $\Delta h_{\chi} \approx \frac{\kappa \cdot P_A}{C+K}$.

Порівнявши формули (7.9) та (7.10), отримуємо формулу (7.4).

Метод Сімса-Головіна. Як видно з рис.7.1...7.3, для усунення наслідків впливу різних причин збільшення вихідної товщини прокату необхідно зменшувати зазор між валками.

Величина цього зазору може бути визначена з наступних міркувань.

З рис.7.4 видно, що для компенсації Δh необхідно змістити робочу точку з точки "В" в точку "Е". При цьому тиск збільшується на ΔP_{BE} до величини P_E . З трикутника ЕКВ маємо, що $KB = KL + LB = \Delta S$, $LB = \Delta h$, $KL = \Delta P_{BE} / \text{tg} \alpha = \Delta P_{BE} / C$. Таким чином, замінюючи для узагальнення ΔP_{BE} на ΔP , отримуємо у приращеннях

$$\Delta h = \Delta S - \frac{\Delta P}{C}. \quad (7.12)$$

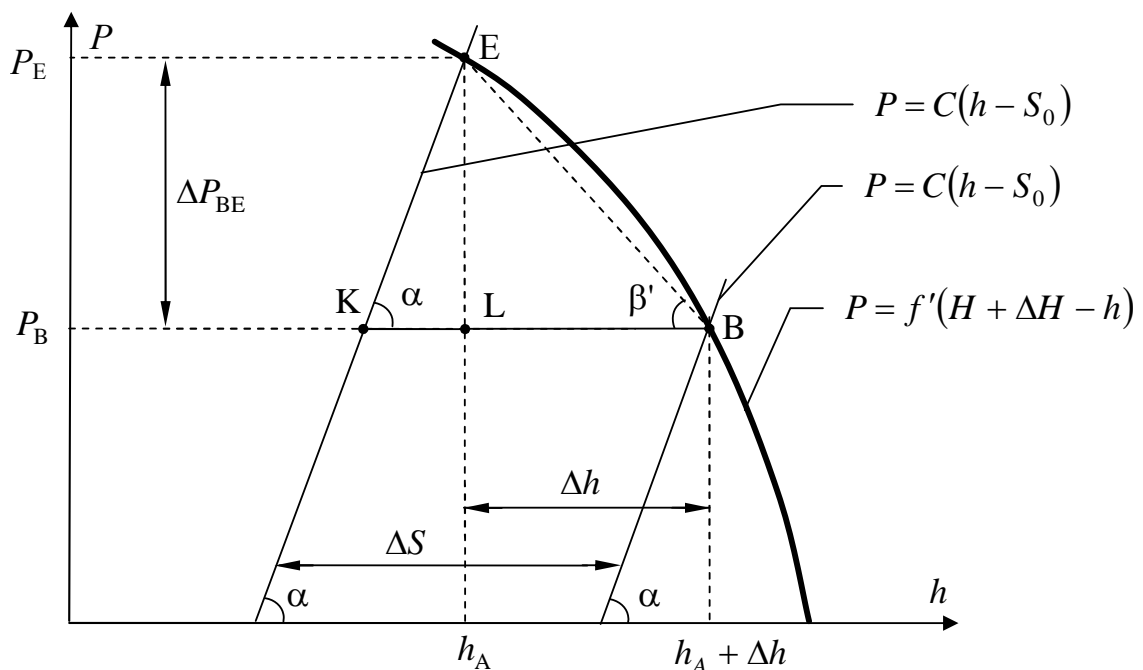


Рис.7.4. Визначення зазору між валками для усунення різнотовщинності

Інтерпретація формули (7.12) аналогічна формулі (7.4), але при зміні зазору між валками. Тобто, зменшення вихідної товщини прокату Δh визначається величиною приросту зазору між валками ΔS за виключенням величини пружної деформації валків $\Delta P/C$.

Перейдемо до абсолютних значень змінних, що входять до формули (7.12), додаючи абсолютні значення робочої точки "В" і враховуючи знаки прирощень

$$h_B - \Delta h = S_0 - \Delta S + \frac{P_B + \Delta P}{C}. \quad (7.13)$$

Рівняння (7.13) відповідає робочій точці "Е" з поточними значеннями товщини прокату h , зазору між валками S та тиском на валки P . Тому з цієї формули можна непрямым способом вирахувати товщину прокату

$$h = S + \frac{P}{C} \quad (7.14)$$

Цей метод непрямого визначення товщини прокату називається *методом Сімса-Головіна*. Він використовується в САРТ і Н при усуненні різнотовщинності прокату.

7.3. САРТ і Н неперервних станів гарячої прокатки

Для забезпечення автоматизації технологічного процесу прокатки на неперервному стані гарячої прокатки необхідно вимірювати ряд технологічних параметрів, серед яких найбільш важливими є товщина і ширина смуги, тиск металу на валки, натяг і температура смуги.

Вимірювання товщини смуги може бути прямим та непрямым.

При прямому способі вимірювання товщини смуги використовують мікрометри, що летять, рентгенівського або радіоізотопного типу. Рентгенівські вимірювачі товщини (РВТ) мають діапазон вимірювань 0...12 мм і встановлюються після останньої кліті чистової групи. Радіоізотопні вимірювачі товщини (РІВТ) мають діапазон вимірювань 20...90 мм і тому встановлюються перед чистовою групою.

При непряму способі вимірювання товщини смуги використовують метод Сімса-Головіна, а саме – формулу (7.14). Для цього вимірюють положення верхнього валка для визначення розкриття валків (зазору між валками) та тиск металу на валки.

Для визначення положення верхнього валка використовують різні датчики: потенціометричні, індукційні, ємнісні, дискретні. В електричному приводі натискних гвинтів положення верхнього валка визначається заданням на кутове положення валу електродвигуна.

Для визначення тиску використовують тензометричні або магнітострикційні датчики. Вони розташовуються під натискними гвинтами або під подушками нижніх опорних валків. Останній варіант є найбільш розповсюджений.

Для регулювання натягу в міжклітьовому проміжку знаходиться датчик визначення непрямого натягу (петлеутримувач).

Петлеутримувач представляє з себе ролик, який підпирає смугу, створюючи її нахил. Залежно від натягу смуги змінюється сила дії смуги на ролик, внаслідок чого ролик відхиляється у вертикальному напрямі, встановлюючи нову рівновагу при іншому куті нахилу. Таким чином, кут нахилу є непрямим параметром регулювання кута положення. Якщо у якості приводу петлеутримувача слугує електродвигун, то по зміні моменту на його валу також можна судити про зміну натягу. Сигнал, пропорційний натягу, надходить в систему керування електроприводом окремої кліті.

Існує три варіанти структури регулювання натягу чистової групи. Якщо число клітей – N , то число міжклітьових проміжків петлеутримувачей – $N-1$, тобто один привод кліті не матиме сигналу від петлеутримувача. Така кліть називається базовою. Вона може бути розташована в трьох місцях: перша, середня, остання (рис.7.5).

Регулювання натягу дозволяє стабілізувати роботу групи клітей і усунути згубний вплив ударного прикладення навантаження і різнотовщинності.

Для регулювання товщини смуги використовується "грубий" і "тонкий" способи (рис.7.6).

У "*грубому*" способі регулювання товщини смуги застосовується регулювання товщини за допомогою натискних гвинтів, які ставлять на останніх клітях групи, виключаючи останню кліть. В останній кліті обтискування мале, тому ця кліть є такою, що гладить.

Натискні гвинти не ставляться на перших клітях, оскільки тут здійснюється авторегулювання товщини за рахунок деформації валків.

"Грубе" регулювання товщини проводиться приводом натискних гвинтів. Для цього формується сигнал, пропорційний тиску металу на валки, який знімається з датчика тиску ДТ під п'ятою натискного гвинта. Також формується сигнал, пропорційний зазору між валками, який знімається з датчика положення ДП натискного гвинта (рис.7.6). Ці сигнали сумуються в пристрої автоматичного контролю товщини АКТ. Таким чином на виході АКТ відповідно до методу Сімса-Головіна утворюється сигнал, пропорційний товщині смуги. Він порівнюється із заданим. Сигнал розузгодження надходить на привод натискного гвинта, приводячи його в рух. Привод усуває похибки з товщини смуги.

"Тонкий" спосіб регулювання товщини смуги забезпечується регуляторами натягу смуги РНС, які впливають на систему регулювання електроприводом кожної кліті чистової групи. Сигналом завдання РНС є сигнали з шини запровадочної швидкості і шини прискорення.

Для підвищення точності прокатки смуги використовують датчики прямого заміру товщини РВТ або РІВТ. Датчик РВТ ставлять за останньою групою, оскільки в міжклітьових проміжках смуга відхиляється від гори-

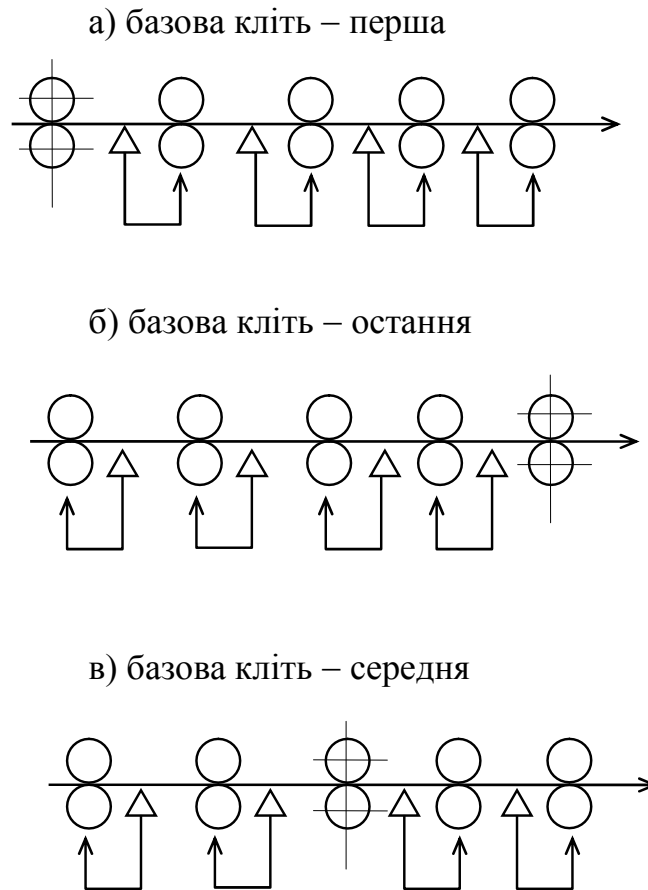


Рис.7.5. Схеми розташування базової к кліті

зонталі через наявність петлеутримувача, і датчик дає похибки. Сигнал від РВТ впливає на натискні гвинти (грубе регулювання) і на РНС привода останніх клітей (точне регулювання).

САРТ і Н стана гарячої прокатки смуги на рис.7.6 виконується за схемою 7.5,в. Натяг підтримується на постійному рівні у міжклітьовому проміжку за рахунок регуляторів натягу смуги РНС під впливом сигналу від петлеутримувачів П. Сигнал від петлеутримувачів діє у сторону зниження розугодження за натягом. Регулювання товщини смуги виконується одночасним впливом на натискні гвинти 3, 5 та 6-ї клітей та на зміну натягу смуги між клітьми 3 і 4, 5 і 6 та 6 і 7.

У даному випадку використання додаткового РВТ у міжклітьовому проміжку 3-4 для регулювання товщини смуги шляхом впливу на АКТ 3-ї кліті має за мету полегшити роботу АКТ 6-ї та 7-ї клітей. Мається на увазі зменшення струмового навантаження на двигуни цих клітей та підвищення швидкодії їх натискних гвинтів через зменшення похибки регулювання товщини за рахунок роботи натискних гвинтів 3-ї кліті.

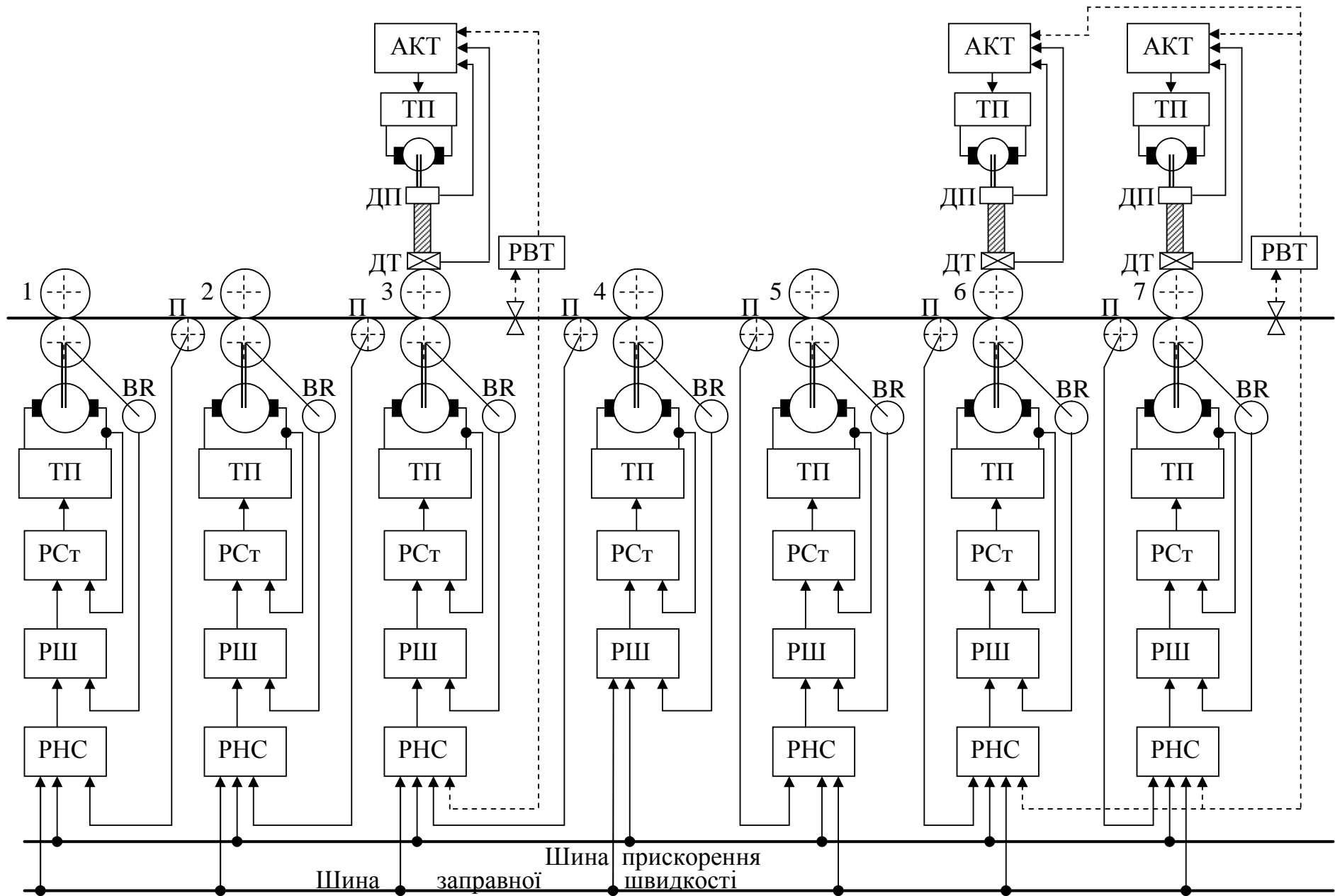


Рис.7.6. Схема САРТ і Н стана гарячої прокатки смуги

7.4. Теоретичні принципи регулювання товщини металу при холодній прокатці

Допустимі відхилення товщини смуги, що прокатується "холодним" способом, не повинні перевищувати 1...2%. Крім того, смуга повинна мати мінімально можливі спотворення поверхні при максимальній продуктивності стана.

В процесі прокатки виникає ряд збурень, які впливають на якість смуги. Серед основних є такі:

- початкова нерівномірність товщини смуги, що надходить у першу кліть стана;
- нерівномірність механічних властивостей смуги, що надходить на вхід стана;
- різні умови тертя в зонах деформації клітей, що викликані різними умовами змазки;
- ексцентричність опорних валків;
- збурення, викликані прискореннями та гальмуваннями стана.

Компенсація наведених і інших збурень забезпечується, як і у випадку неперервної гарячої прокатки, регулюванням товщини і натягу смуги в процесі прокатки. Для цього використовують регулюючі впливи на привод натискних гвинтів для зміни розчину валків відповідної кліті та головні приводи клітей для зміни швидкості робочих валків.

Основною умовою неперервної прокатки є сталість секундного об'єму металу у клітях (див. розділ 2). Тобто, через кожен кліть у одиницю часу проходить одна й та ж кількість металу. Умови сталості секундного об'єму металу при незмінності ширини смуги записується у відповідності до формули (2.4) як

$$h_1 v_1 = h_2 v_2 = h_3 v_3 = \dots = h_n v_n, \quad (7.15)$$

де $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$ – товщина металу перед входом у відповідну кліть;

$v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ – швидкість руху металу перед входом у кліть.

При впливі на розхил валків i -ї кліті або її швидкість з умови сталості секундного об'єму металу з формули (7.15) випливає

$$(h_1 + \Delta h_1)(v_1 + \Delta v_1) = (h_i + \Delta h_i)(v_i + \Delta v_i) = \dots = (h_n + \Delta h_n)(v_n + \Delta v_n), \quad (7.16)$$

де $\Delta h_1, \Delta h_i, \dots, \Delta h_n, \Delta v_1, \Delta v_i, \dots, \Delta v_n$ – відхилення товщини та швидкості металу на виходах відповідних клітей у результаті впливу на натискні гвинти або швидкість i -ї кліті.

Знаки відхилень товщини та швидкості смуги на виході j -ї кліті залежатимуть від того, який вплив виконується (на привод натискних гвинтів або привод валків i -ї кліті) та положенням j -ї кліті відносно i -ї.

Розкриваючи дужки у формулі (7.16), маємо для i -ї та j -ї клітей

$$h_i \vartheta_i + h_i \Delta \vartheta_i + \vartheta_i \Delta h_i + \Delta \vartheta_i \Delta h_i = h_j \vartheta_j + h_j \Delta \vartheta_j + \vartheta_j \Delta h_j + \Delta \vartheta_j \Delta h_j. \quad (7.17)$$

Оскільки швидкість холодної прокатки досить висока, а товщина смуги – мала, можна вважати, що $\Delta \vartheta_i \ll \vartheta_i$, $\Delta \vartheta_j \ll \vartheta_j$, $\Delta \vartheta_i \rightarrow 0$, $\Delta \vartheta_j \rightarrow 0$, $\Delta h_i \rightarrow 0$, $\Delta h_j \rightarrow 0$.

Нехтуючи малими величинами 2-го порядку малості $\Delta \vartheta_i \Delta h_i$ та $\Delta \vartheta_j \Delta h_j$, а також виконавши певні перетворення формули (7.17), отримуємо

$$h_i \vartheta_i \left(1 + \frac{\Delta h_i}{h_i} + \frac{\Delta \vartheta_i}{\vartheta_i} \right) = h_j \vartheta_j \left(1 + \frac{\Delta h_j}{h_j} + \frac{\Delta \vartheta_j}{\vartheta_j} \right). \quad (7.18)$$

Враховуючи формулу (7.15), знаходимо для усіх клітей

$$\frac{\Delta h_1}{h_1} + \frac{\Delta \vartheta_1}{\vartheta_1} = \frac{\Delta h_2}{h_2} + \frac{\Delta \vartheta_2}{\vartheta_2} = \dots = \frac{\Delta h_i}{h_i} + \frac{\Delta \vartheta_i}{\vartheta_i} = \dots = \frac{\Delta h_n}{h_n} + \frac{\Delta \vartheta_n}{\vartheta_n}. \quad (7.19)$$

Формула (7.19) відбиває закон сталості секундного об'єму металу у відносних величинах відхилень товщини та швидкості смуги з незмінною шириною при впливі на натискні гвинти або швидкість i -ї кліті.

Вплив на переміщення натискних гвинтів. Після впливу натискних гвинтів у i -й кліті товщина металу на її виході зміниться на величину Δh_i . Вважаючи, що зміна товщини металу в результаті роботи натискних гвинтів i -ї кліті у інших клітях є переважаючим у порівнянні зі зміною швидкості металу в них, приймаємо

$$\Delta \vartheta_1 \approx \Delta \vartheta_2 \approx \dots \approx \Delta \vartheta_i \approx \dots \approx \Delta \vartheta_n. \quad (7.20)$$

Підставляючи формулу (7.20) у формулу (7.19), маємо

$$\frac{-\Delta h_1}{h_1} \approx \dots \approx \frac{\Delta h_i}{h_i} \approx \dots \approx \frac{\Delta h_n}{h_n}. \quad (7.21)$$

Таким чином, *відносна зміна товщини смуги у клітях стана при впливі натискних гвинтів будь-якої кліті є величиною постійною при прийнятих припущеннях. При цьому товщина смуги до i -ї кліті збільшується, а після i -ї кліті – зменшується, якщо виконується вплив на переміщення натискних гвинтів i -ї кліті в сторону зменшення зазору між валками.*

Вплив на швидкість робочих валків. Зміна швидкості робочих валків i -ї кліті впливає на товщину металу та його швидкість у ін-

ших клітках. Якщо виконується вплив на швидкість робочих валків i -ї кліті, то для j -ї кліті отримуємо з формули (7.19)

$$\frac{\Delta h_i}{h_i} + \frac{\Delta \vartheta_i}{\vartheta_i} = \frac{\Delta h_j}{h_j} + \frac{\Delta \vartheta_j}{\vartheta_j}. \quad (7.22)$$

Оскільки переважаючим впливом на зміну товщини смуги в клітках стана є зміна швидкості металу на виході i -ї кліті, приймаємо умову (7.20) за виключенням $\Delta \vartheta_i \neq 0$ і $\Delta h_i \approx 0$. Отримуємо

$$\frac{\Delta h_j}{h_j} \approx \frac{\Delta \vartheta_i}{\vartheta_i}. \quad (7.23)$$

Враховуючи формулу (2.6), отримуємо для кутової швидкості валків i -ї кліті ϑ_i і її зміни $\Delta \vartheta_i$

$$\vartheta_i = D_i \omega_i (1 + S_i) / 2, \quad (7.24)$$

$$\vartheta_i + \Delta \vartheta_i = D_i (\omega_i + \Delta \omega_i) (1 + S_i + \Delta S_i) / 2, \quad (7.25)$$

де ΔS_i – зміна випередження смуги на виході i -ї кліті після зміни її кутової швидкості на $\Delta \omega_i$.

З формул (7.24) і (7.25) випливає пряма залежність між лінійною швидкістю металу на виході i -ї кліті і кутовою швидкістю її робочих валків, якщо вважати, що $\Delta S_i \approx 0$.

Згідно з формулою (1.4) випередження S є різницею між вихідною швидкістю металу та лінійною швидкістю валків, віднесеною до лінійної швидкості валків, тобто є відносною величиною. Тому зміною цієї величини при високій швидкості прокатки можна нехтувати і вважати $\Delta S_i \approx 0$. Тоді формула (7.23) матиме вигляд

$$\frac{\Delta h_j}{h_j} \approx \frac{\Delta \omega_i}{\omega_i}. \quad (7.26)$$

Якщо $i > j$, то збільшення кутової швидкості валків i -ї кліті призводить до зменшення товщини смуги у j -й кліті через збільшення сили натягу T і випередження, обумовленого цією силою (див. формулу (2.9)), тобто $\Delta \omega_i > 0$, $\Delta h_j < 0$.

Якщо $i < j$, то збільшення кутової швидкості валків i -ї кліті призводить до збільшення товщини смуги у j -й кліті через виникнення підпору (див. формулу (2.12)), тобто $\Delta \omega_i > 0$, $\Delta h_j > 0$.

З урахуванням знаку зміни товщини смуги у клітках стана холодної прокатки при впливі на кутову швидкість робочих валків i -ї кліті, отримуємо

$$\frac{-\Delta h_1}{h_1} = \frac{-\Delta h_2}{h_2} = \dots = \frac{\Delta \omega_i}{\omega_i} = \dots = \frac{\Delta h_n}{h_n}. \quad (7.27)$$

Таким чином, відносна зміна товщини смуги у клітках стана прямопропорційно залежить від відносної кутової швидкості робочих валків i -ї кліті. При цьому товщина смуги до i -ї кліті зменшується при збільшенні кутової швидкості, а після i -ї кліті – збільшується.

На практиці для забезпечення зміни товщини смуги в одну сторону, виконують регулювання швидкості першої, або останньої кліті стана.

7.5. САРТ і Н неперервних станів холодної прокатки

Структура системи автоматичного регулювання товщини і натягу неперервних станів холодної прокатки представлена на рис.7.7.

САРТ і Н будується на основі автоматизованих систем електроприводів окремих клітей та розмотувачів і моталок стана.

Електропривод клітей має свою систему регулювання швидкості. Кожна з систем СР1...СР5 будується за принципами, представленими у четвертому розділі. Сигналами завдання для СР1...СР5 є сигнали завдання загальної швидкості $\vartheta_{зад}$, прискорення від системи регулювання швидкості стана СРШ.

Система регулювання електроприводом розмотувача СРМ1 та система регулювання електроприводом моталки СРМ2 будується за принципом підтримання постійного натягу смуги відповідно до викладеного у шостому розділі.

В систему автоматичного регулювання товщини смуги входять два основних регулятора. Вони відповідають за "грубе" і "тонке" регулювання товщини смуги.

"Грубе" регулювання товщини смуги. Таке регулювання призначене для усунення початкової різнотовщинності смуги. У цьому випадку регулювання товщини смуги на виході стана виконується шляхом впливу на швидкість робочих валків першої та другої клітей від сигналу вимірювача товщини ВТ1, який встановлюється після цієї, або після другої кліті (рис.7.7).

Схема регулювання передбачає два контури регулювання – з регуляторами товщини РТ1 і РТ2.

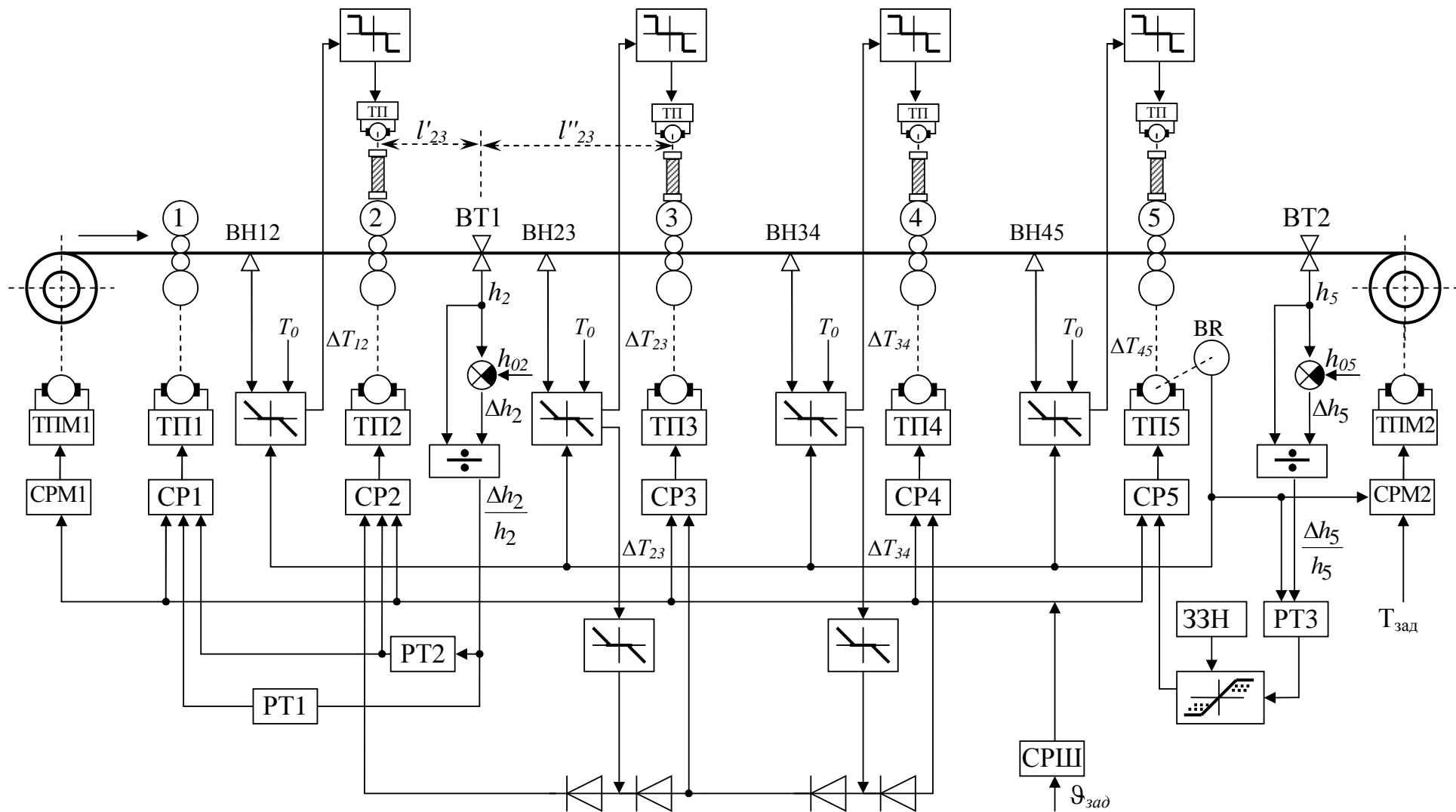


Рис.7.7. САРТ і Н 5-ти клітьового стану холодної прокатки

Контури регулювання товщини включають в себе вимірювач товщини ВТ1, вузол порівняння поточного значення товщини h_2 та заданого h_{02} , вузол ділення для отримання відносного значення $\Delta h_2/h_2$ відхилення товщини смуги Δh_2 від заданого h_2 і регулятор товщини РТ1 або РТ2.

Контур регулювання з регулятором РТ1 призначений для корегування товщини смуги у валках другої кліті. Для цього контур впливає на швидкість валків першої кліті через систему регулювання швидкості привода кліті СР1 за результатами виміру товщини вимірювачем ВТ1. Оскільки сигнал з вимірювача товщини ВТ1 надходить у систему керування електроприводом СР1 із запізненням, ставиться регулятор РТ1, що забезпечує компенсацію запізнення.

Запізнення сигналу відхилення $\Delta h_2/h_2$ обумовлене тим, що вимірювач ВТ1 знаходиться на відстані l'_{23} після другої кліті. Час запізнення визначається як сумарне значення часу руху смуги з вихідною лінійною швидкістю металу другої кліті вздовж шляху l'_{23} і часу запізнення на опрацювання сигналів та розрахунки у системі керування.

Другий контур керування з регулятором РТ2 призначений для корегування товщини смуги у валках третьої кліті. Для цього контур одночасно впливає на швидкості перших двох клітей через систему регулювання швидкості приводів клітей СР1 та СР2 за результатами виміру товщини вимірювачем ВТ1.

У цьому випадку сигнал з вимірювача товщини ВТ1 надходить у систему керування електроприводами СР1 і СР2 із випередженням. Тому у контур ставиться регулятор РТ2, що забезпечує затримку сигналу на час випередження.

Випередження сигналу відхилення $\Delta h_2/h_2$ обумовлене тим, що вимірювач ВТ1 знаходиться на відстані l''_{23} перед другою кліттю. Час випередження визначається як різниця між часом, обумовленим рухом смуги з вихідною лінійною швидкістю металу другої кліті вздовж шляху l''_{23} , і часом запізнення на опрацювання сигналів та розрахунки у системі керування.

"Тонке" регулювання товщини смуги. "Тонке" регулювання товщини смуги призначене для встановлення остаточної товщини смуги на виході останньої кліті стана. Для цього виконується регулювання товщини смуги на вході стана шляхом впливу на швидкість робочих валків останньої кліті від сигналу вимірювача товщини смуги ВТ2, встановленого за останньою кліттю (рис.7.7).

Вимірювач товщини ВТ2 вимірює поточну товщину смуги h_5 , і сигнал, пропорційний цій товщині, порівнюється у вузлі порівняння із заданим значенням h_{05} . Різниця Δh_5 надходить на вузол ділення, де отримується сигнал, пропорційний відносному значенню відхилення товщини смуги від заданої після останньої кліті $\Delta h_5/h_5$.

Сигнал, пропорційний $\Delta h_5/h_5$, подається на регулятор РТЗ, який забезпечує компенсацію запізнення у визначенні товщини смуги аналогічно тому, як це робиться при "грубому" регулюванні регулятором РТ1.

У регуляторі РТЗ передбачена зміна коефіцієнта передачі в залежності від швидкості прокатування. Для цього сигнал з тахогенератора ВР подається на регулятор РТЗ.

У контурі регулювання товщини смуги на виході стана передбачена ланка, що створює зону нечутливості. Величина зони нечутливості вибирається рівною амплітуді коливань товщини смуги на виході стана. Регулювання зони нечутливості забезпечується задатчиком зони нечутливості ЗЗН з метою виключення впливу незначних коливань товщини смуги на роботу системи "тонкого" регулювання.

Вихідний сигнал регулятора РТЗ надходить на вхід системи регулювання СР5 приводом 5-ї кліті, забезпечуючи регулювання швидкості валків останньої кліті і, таким чином, підтримки сталості товщини смуги на виході стана.

Регулювання натягу смуги у неперервному стані холодної прокатки. У неперервних станах холодної прокатки для отримання стійкості процесу прокатки та високоякісної продукції необхідне регулювання сталості натягу між клітьми.

У сучасних системах автоматичного регулювання натягу смуги використовується вплив на переміщення натискних гвинтів та швидкість клітей.

Регулювання натягу смуги впливом на натискні гвинти є основним. Регулювання натягу впливом на швидкості клітей є додатковим і необхідне у зв'язку з тим, що швидкодія приводів натискних гвинтів недостатньо висока. При значних змінах натягу контури регулювання положення цих приводів не встигають відпрацювати керуючі сигнали. При високій швидкодії приводів натискних гвинтів використання систем керування швидкістю клітей для регулювання натягу не є обов'язковим.

Вплив на швидкість якої-небудь з проміжних клітей змінює передній і задній натяг, а також змінюється товщина смуги цієї кліті. Товщина смуги вирівнюється у подальших клітях, а зміна заднього натягу направлена на вирівнювання миттєвих об'ємів металу смуги. Наприклад, якщо збільшити швидкість i -ї кліті, то натяг у $(i-1)$ -ї міжклітьовому проміжку збільшиться, а натяг у $i-(i+1)$ -му міжклітьовому проміжку залежатиме від режиму прокатки і роботи $(i+1)$ -ї кліті. Якщо швидкість $(i+1)$ -ї кліті не змінюється, то натяг між i -ю і $(i+1)$ -ю клітьми зменшується. Якщо одночасно піднімати швидкість $(i+1)$ -ї кліті, то напрям і величина натягу буде залежати від темпу зростання швидкостей суміжних клітей і їх кінцевих швидкостей. У зв'язку із неоднозначністю зміни переднього натягу i -ї кліті вплив на швидкість проміжних клітей зазвичай не використовується для регулювання натягу.

Вплив на натискні гвинти i -ї проміжної кліті не викликає значної зміни швидкості цієї кліті. У цьому випадку зміна швидкості кліті обумовлена зміною навантаження на електропривод валків, тобто статичною похибкою за швидкістю. Оскільки швидкість кліті практично не змінюється, задній натяг теж залишається приблизно незмінним. Передній натяг змінюється у напрямку вирівнювання миттєвих об'ємів металу смуги. Якщо, наприклад, розхил валків i -ї кліті зменшується, то передній натяг зростає через зменшення перетину металу i , навпаки, при збільшенні розчину валків i -ї кліті передній натяг зменшується. Така однозначна залежність між розхилом валків кліті і переднім натягом дозволяє забезпечувати регулювання натягу смуги.

Розглянемо принципи регулювання товщини смуги у одному міжклітьовому проміжку (рис.7.8). Сигнал від вимірювача натягу ВН, пропорційний силі натягу смуги T , порівнюється із заданим значенням T_0 . Задане значення натягу визначається вальцювальником. Різниця сигналів ΔT подається на ланку зони нечутливості ЗН. Зона нечутливості встановлюється рівною амплітуді високочастотних коливань натягу, пов'язаних із ексцентриситетом опорних валків. Ці коливання є корисними для регулювання натягу і тому не компенсуються.

Під впливом ексцентриситета опорних валків розхил валків періодично змінюється. Змінюється також і тиск валків на метал. Збільшення розхилу валків призводить до збільшення товщини смуги, а зменшення розхилу валків – до зменшення товщини. Зона нечутливості системи регулювання натягу дозволяє не реагувати на ці коливання. У цьому випадку при відсутності регулювання натягу змінюється передній (збільшується) і задній (зменшується) натяг смуги відносно кліті, що розглядається.

Збільшення переднього і зменшення заднього натягів призводить до зниження навантаження привода валків, зменшення пружної деформації кліті і, відповідно, до зменшення товщини смуги. Таким чином, сили натягу мають властивості вирівнювання товщини смуги при неперервній прокатці.

Сигнал зміни натягу, що перевищує встановлену зону нечутливості, від блоку ЗН надходить на вхід релейного блоку РБ, що має трипозиційну релейну характеристику і далі – в систему регулювання натискними гвинтами $i+1$ -ї кліті СРНГ. Зона нечутливості робить інваріантною СРНГ до високочастотних коливань натягу, а зміна натягу смуги діє на систему регулювання приводом у сторону підйому натискних гвинтів при зменшенні натягу і опускання натискних гвинтів при збільшенні натягу.

Для підвищення стійкості регулювання натягу у системі передбачається компенсація шляху вибігу натискних гвинтів. Це досягається шляхом зміщення зони нечутливості блоку ЗН пропорційно квадрату швидкості переміщення натискних гвинтів.

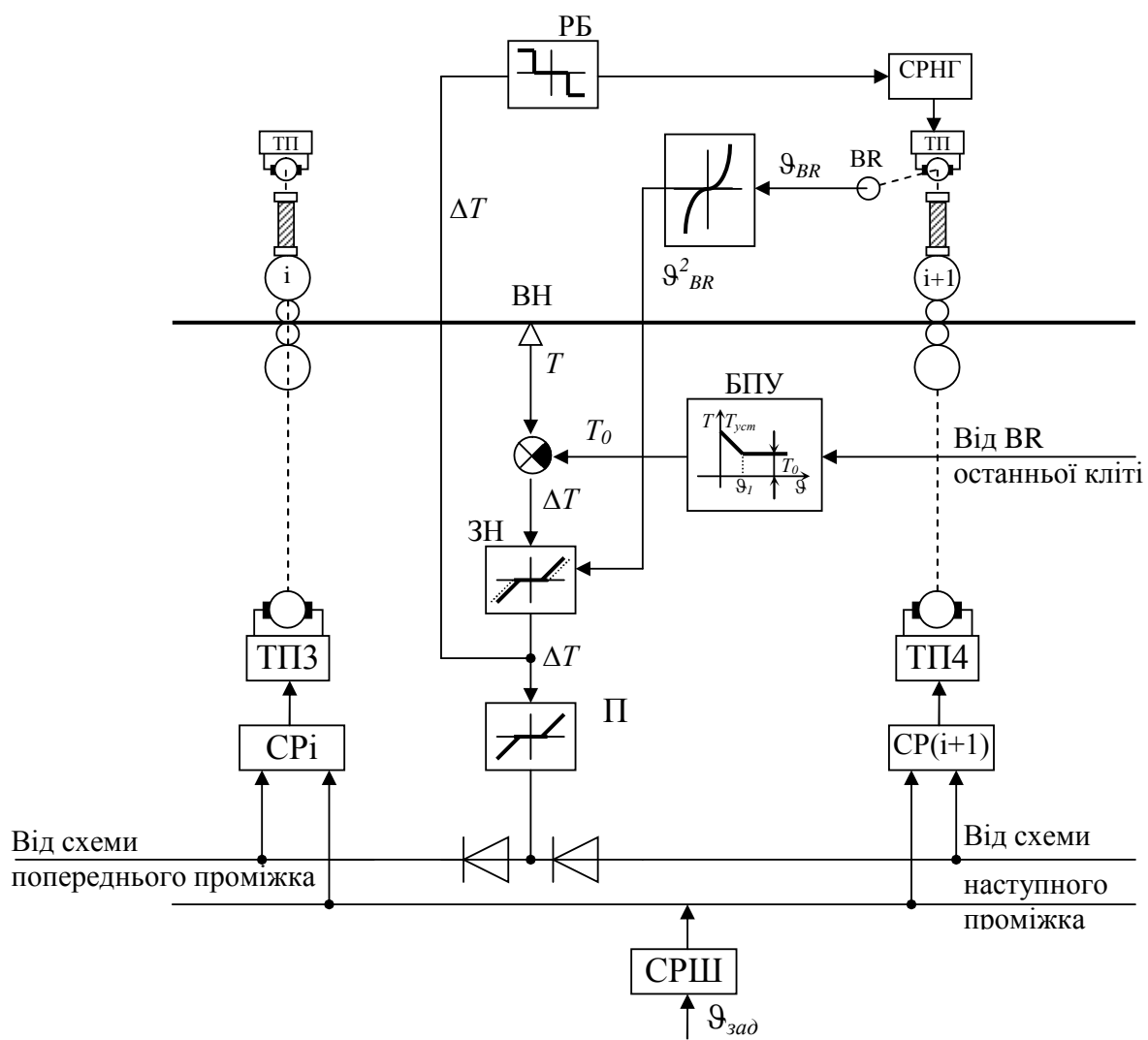


Рис.7.8. Система регулювання натягу для одного міжклітьового проміжку

Зміщення виконується у бік відхилення натягу на значення, що пропорційне шляху гальмування натискних гвинтів, що призводить до подачі сигналу на зупинку натискних гвинтів з деяким випередженням.

Для підтримки стійкості натягу смуги в процесі прискорення і гальмування використовують блок перевищення уставки БПУ.

За допомогою цього блоку виконується автоматичне збільшення уставки натягу при зменшенні швидкості прокатки нижче певного значення. На вхід БПУ подається сигнал, пропорційний лінійній швидкості $\vartheta_{вих}$ виходу смуги з останньої кліти стану. При умові $\vartheta_{вих} > \vartheta_1$ $T = T_0$, а при $\vartheta_{вих} < \vartheta_1$ уставка натягу збільшується пропорційно зменшенню швидкості прокатки, що забезпечує компенсацію впливу зниження швидкості прокатки на натяг.

Сигнал від підсилювача П в залежності від знака розузгодження ΔT подається до системи регулювання попередньої $(i - 1)$ -ї кліти або наступної $(i + 1)$ -ї кліти. В обох випадках сигнал працює в сторону гальмування. Якщо розузгодження натягу більше верхньої границі зони нечутливості, гальмується двигун $(i + 1)$ -ї кліти. Якщо розузгодження натягу менше нижньої границі зони нечутливості, гальмується двигун $(i - 1)$ -ї кліти. Умовно розділення знаків вихідного сигналу підсилювача П показано на рис.7.8 у вигляді діодів.

Система регулювання натягу для одного міжклітьового проміжку є складовою загальної системи регулювання натягу смуги неперервного стану холодної прокатки (рис.7.7). На рисунку зображена система регулювання натягу п'ятиклітьового неперервного стану з регулюванням натягу у всіх міжклітьових проміжках шляхом впливу на натискні гвинти кожної подальшої кліти. Додаткове регулювання натягу забезпечується впливом на швидкості проміжних клітей (2, 3 і 4).

Контрольні запитання

1. Основні причини різнотовщинності.
2. Що впливає на товщину металу, що прокатується?
3. Теоретичне обґрунтування впливу вхідної товщини заготовки на вихідну товщину прокату при постійному початковому зазорі між валками та незмінних механічних властивостях металу.
4. Теоретичне обґрунтування впливу механічних властивостей металу на вихідну товщину прокату при постійному початковому зазорі між валками та незмінній початковій товщині заготовки.
5. Теоретичне обґрунтування одночасного впливу початкової товщини заготовки та механічних властивостей металу на вихідну товщину прокату при постійному початковому зазорі між валками.

6. Теоретичне обґрунтування Методу Сімса-Головіна.
7. Пояснити прямий і непрямий способи вимірювання товщини смуги в режимі гарячої прокатки.
8. Описати "грубий" спосіб регулювання товщини смуги.
9. Описати "тонкий" спосіб регулювання товщини смуги.
10. Пояснити принципи роботи САРТ і Н станів неперервної гарячої прокатки
11. Перерахувати ряд збурень, які впливають на якість смуги при неперервній холодній прокатці.
12. Викласти закон сталості секундного об'єму металу у відносних величинах відхилень товщини та швидкості смуги з незмінною шириною при впливі на натискні гвинти або швидкість i -ї кліті.
13. Пояснити вплив переміщення натискних гвинтів i -ї кліті на товщину металу при неперервній холодній прокатці.
14. Пояснити вплив швидкості робочих валків i -ї кліті на товщину металу при неперервній холодній прокатці.
15. Принципи роботи системи "грубого" регулювання товщини смуги у неперервному стані холодної прокатки.
16. Принципи роботи системи "тонкого" регулювання товщини смуги неперервному стані холодної прокатки.
17. Принципи регулювання натягу смуги у неперервному стані холодної прокатки.
18. Пояснити принципи роботи САРТ і Н станів неперервної холодної прокатки.



ЕЛЕКТРОПРИВОД ПРОКАТНИХ СТАНІВ

8.1. Реверсивні стани гарячої прокатки

Сучасні обтискні стани мають тільки індивідуальний привод валків. Потужність головного привода досягає 12...13 МВт. Напруга двигунів – 750...1000 В, частота обертання 50...65 об/хв, максимальна (при ослабленому потоку) – до 120 об/хв.

Схема керування головним електроприводом стана. У відповідності з вимогами до електропривода, які сформульовані у п.2.1, для головного електропривода реверсивних станів використовують реверсивний електропривод постійного струму з двохзонним регулюванням швидкості (рис.8.1). При цьому структура системи керування швидкістю виконується на основі пропорційного або пропорційно-інтегрального регулятора частоти обертання AR , підпорядкованого контуру струму якоря і зворотного зв'язку від тахогенератора BR та датчика кутової швидкості UR .

Контур струму якоря будується на основі пропорційно-інтегрального регулятора струму якоря AA і зворотного зв'язку від датчика струму якоря $UA1$. Регулятор струму AA , зазвичай, виконується з адаптацією до режиму переривчастих струмів.

Система керування потоком збудження двигуна є залежною від ЕРС двигуна і виконується з регулятором ЕРС AE й підпорядкованим регулятором потоку збудження APV . Обмеження виходу регулятора швидкості може змінюватися у функції потоку збудження двигуна, сигнал якого формується за допомогою датчика струму збудження $UA2$ та функціонального перетворювача $AF1$, що забезпечує функціональну залежність між струмом збудження та потоком за рахунок апроксимації кривої намагнічування.

Оператор за допомогою сельсинного командоапарата $СКА$ задає сигнал, що перетворюється фазообертателем у сигнал завдання на швидкість. Далі сигнал завдання формується за допомогою задатчика інтенсивності AII , у якому передбачається можливість зміни темпу розгону й гальмування в залежності від величини потоку збудження, а також від режиму роботи привода (розгін або гальмування). Задатчик інтенсивності AII слугує способом обмеження динамічного струму двигуна.

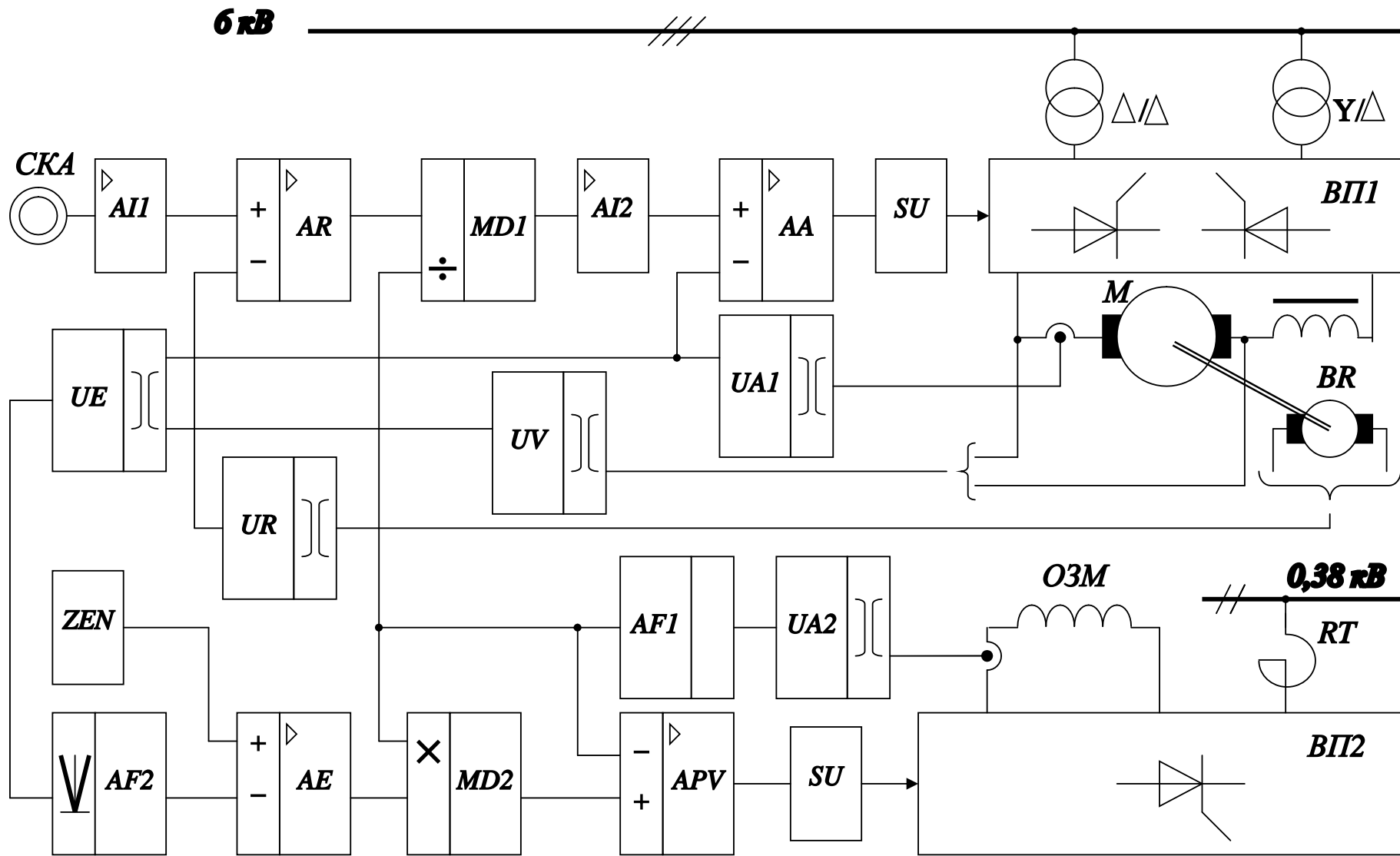


Рис.8.1. Система регулювання частоти обертання двигуна головного привода прокатного стану

Модуль ділення-множення *MD1* забезпечує інваріантність параметрів регулятора швидкості у другій зоні регулювання (див. четвертий розділ). У деяких випадках потрібно обмеження швидкості наростання струму, тоді ставиться ще один задатчик інтенсивності *AI2* на вході регулятора струму.

Перетворення сигналу керування на імпульси відкриття тиристорів забезпечується системою імпульсно-фазного керування *SU*. Сигнал завдання на номінальну ЕРС створює задатчик *ZEN*. Формування зворотного зв'язку за ЕРС виконується за допомогою датчика ЕРС *UE*, який алгебраїчно сумує сигнали від датчика струму якоря *UAI* і датчика напруги *UV*.

Датчик напруги має структуру аперіодичної ланки з електромагнітною сталою часу якоря (див. п.4.2).

Вихідний сигнал датчика ЕРС надходить на вхід блока виділення модуля ЕРС *AF2* для забезпечення інваріантності сигналу ЕРС при реверсі кутової швидкості двигуна.

Модуль ділення-множення *MD2* забезпечує інваріантність параметрів регулятора потоку *APV* у другій зоні регулювання (див. п.4.3).

Якщо від електропривода реверсивного прокатного стана не вимагається підвищеної точності підтримки заданої швидкості при збуреннях з боку навантаження, використовується електропривод із зворотним зв'язком за ЕРС двигуна (рис.8.2).

Особливістю схеми (рис.8.2) є те, що сигнал завдання U_3 є загальним завданням на швидкість двигуна і потік збудження. Цей сигнал забезпечує наростання ЕРС двигуна у відповідності із завданням від СКА. У першій зоні регулювання ЕРС виконується при насиченому задатчику магнітного потоку *AZP*, який виконує порівняння сигналу завдання із завданням на номінальний потік від задатчика *ZPN*. Саме задатчик *ZPN* своїм сигналом вводить у насичення підсилювач *AZP*. Таким чином, у першій зоні сигнал завдання на потік двигуна є постійним і відповідає завданню на номінальний потік.

Друга зона регулювання кутової швидкості починається після виходу задатчика магнітного потоку *AZP* з насичення. Цей режим виникає, коли сигнал завдання U_3 перевищує сигнал завдання від блоку *ZPN*. Далі різниця між цими сигналами стає негативною, і сигнал завдання на потік на вході регулятора *APV* зменшує потік двигуна пропорційно до зростання його швидкості. При цьому ЕРС двигуна, природньо, буде залишатися постійною.

6 кВ

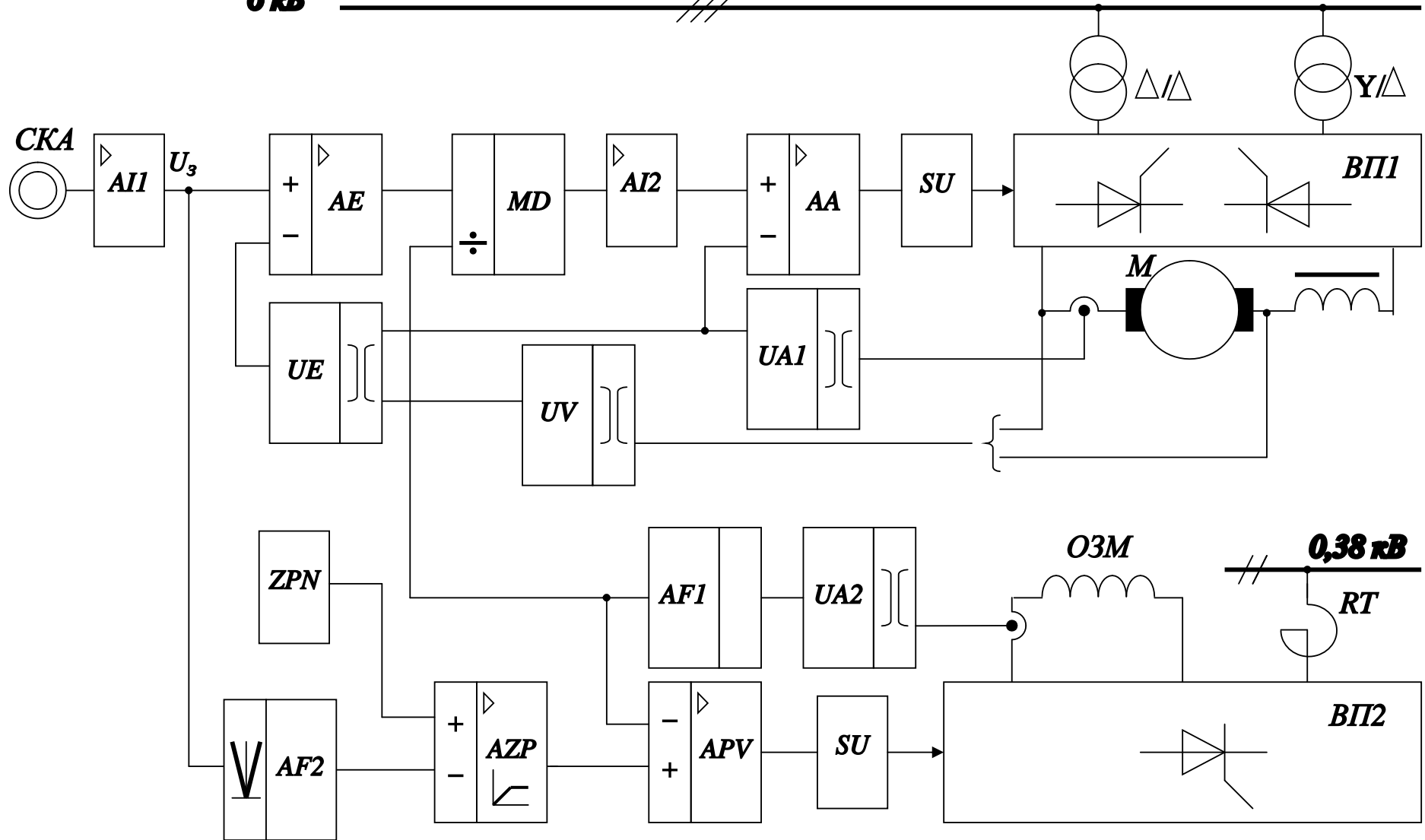


Рис.8.2. Система регулювання ЕРС двигуна головного привода прокатного стану

8.2. Неперервні стани гарячої прокатки

Швидкісний режим прокатки гарячої смуги. До листа, що прокатується в стані, висувається ряд вимог щодо структури смуги, допустимої різновтовщинності тощо. Температура смуги має суттєвий вплив на якість смуги. Наприклад, зменшення температури металу збільшує опір деформації і тиск металу на валки. У свою чергу зростає пружна деформація кліті і валків, за рахунок чого збільшується товщина металу. При сталій швидкості прокатки у неперервному стані смуга поступово охолоджується і температура заднього кінця зменшується, що призводить до росту товщини смуги від переднього кінця до заднього.

З метою зниження ступеня охолодження смуги при прокатці використовують поступове збільшення швидкості прокатки. Збільшення швидкості прокатки викликає зменшення віддачі тепла металу валкам за рахунок скорочення часу контакту металу з валками, а також збільшення кількості тепла, що надходить в метал через зростання опору деформації металу. При певному прискоренні досягається стан теплової рівноваги, коли температура прокатки не змінюється.

При високій швидкості (більше 10...11,5 м/с) прокатки смуга не зможе увійти в останні кліті і у моталку. Тому заправка смуги на стані виконується на заправній швидкості 10...11,5 м/с і після закріплення переднього кінця смуги у моталці подається імпульс на прискорення стана.

Величина прискорення стана вибирається із умови отримання сталої температури прокатки. При високих прискореннях смуга сильно розігрівається. У цьому випадку виникає необхідність у охолодженні смуги між клітьями у процесі прокатки. Такий процес прокатки з високим прискоренням і системою охолодження між клітьями є досить складним і нечасто використовується. На сучасних неперервних станах з використанням системи міжклітьового охолодження досягають швидкості прокатки до 30 м/с з прискоренням 0,35...0,5 м/с².

Найбільш розповсюдженим режимом неперервної гарячої прокатки є режим малого прискорення чистової групи у межах 0,015...0,075 м/с². При цьому швидкість стана у кінці прокатки не перевищує 16...18 м/с.

У кінці прокатки з прискоренням повинно бути виконане зниження швидкості від робочої до заправочної.

Таким чином, прокатка з прискоренням має три етапи: 1) прокатка на заправочній швидкості і заправка смуги у моталку; 2) прокатка з прискоренням; 3) гальмування стана від робочої швидкості до заправочної.

Електропривод кліті. Відомо, що неперервні стани гарячої прокатки мають дві групи клітей – чорнову і чистову (див. другий розділ). Найбільш складним і відповідальним є електропривод чистової групи клітей.

В світовій практиці для чистової групи клітей станів 2-го та 3-го покоління використовують двигуни постійного струму потужністю від 12 до

13 МВт (за кородоном – до 20 МВт) у 2-х, 3-х та 4-х якірному виконанні.

Розглянемо систему керування електроприводом кліті чистової групи стана гарячої прокатки (рис.8.3) як найбільш характерну для такого типу прокатних станів.

Керування приводом кліті чистової групи може бути ручним чи автоматичним через блок керування швидкості *SCB* (рис.8.3). В систему керування приводом входить система керування положенням відпайок трансформатора *TTCS*, яка дозволяє регулювати швидкість привода у першій зоні за рахунок зниження вихідної напруги трансформатора, що живить перетворювач в діапазоні до 66 % вниз від номінальної напруги. Це дає можливість вести прокатку при зниженій швидкості без зарегулювання перетворювача.

Сигнал від системи керування положенням відпайок трансформатора *TTCS* додається до сигналу завдання номінальної ЕРС двигуна на регуляторі ЕРС *AE*. Тому зростання сигналу зворотнього зв'язка за ЕРС, що надходить від датчика ЕРС і функціонального перетворювача *AF3* на регулятор *AE*, до рівня сигналу номінальної ЕРС не викликає зниження потоку. Це має місце тільки при досягненні сигналу зворотнього зв'язка за ЕРС рівня суми сигналів від блоків *ZEN* та *TTCS*.

Коли можливості трансформатора вичерпані, регулювання швидкості забезпечується вихідною напругою тиристорного перетворювача *VPI*.

Тиристорний перетворювач *VPI* побудований за схемою незалежного керування від логічного пристрою переключення груп вентилів *LSD*. Схема живлячого трансформатора вісімкова, тобто трансформатор має дві первинні обмотки, одна з яких з'єднана у вигляді зірки, інша – трикутника, а вторинна – у вигляді подвійної зірки. Така схема забезпечує згладжування пульсацій випрямленої напруги та рівномірне завантаження двох якорів.

Розгін привода здійснюється по сигналу від шини швидкості заправки вхолосту до відповідної швидкості. В той же час реле *P3I* розімкнене, і працює задатчик інтенсивності *AI*. Після заправки по цьому каналу через *SCB* в ручному чи автоматичному режимі здійснюється розгін привода до початкової швидкості прокатки. Після розгону від шини спільного прискорення подається сигнал на спільний розгін всіх приводів чистової групи з прискоренням. Реле *P3I* замикається, шунтуючи задатчик інтенсивності.

Для обмеження ривка швидкості слугує інерційна ланка *AF1*. Для обмеження перерегулювання швидкості при пропорційно-інтегральній структурі регулятора швидкості *AR* передбачена інерційна ланка *AF2*.

При досягненні електроприводом кліті номінальної кутової швидкості включається друга зона регулювання з послабленням потоку.

Послаблення потоку здійснюється шляхом зниження вихідної напруги вентиляного перетворювача *VPI2* обмоток збудження якорів двох'якорного двигуна кліті.

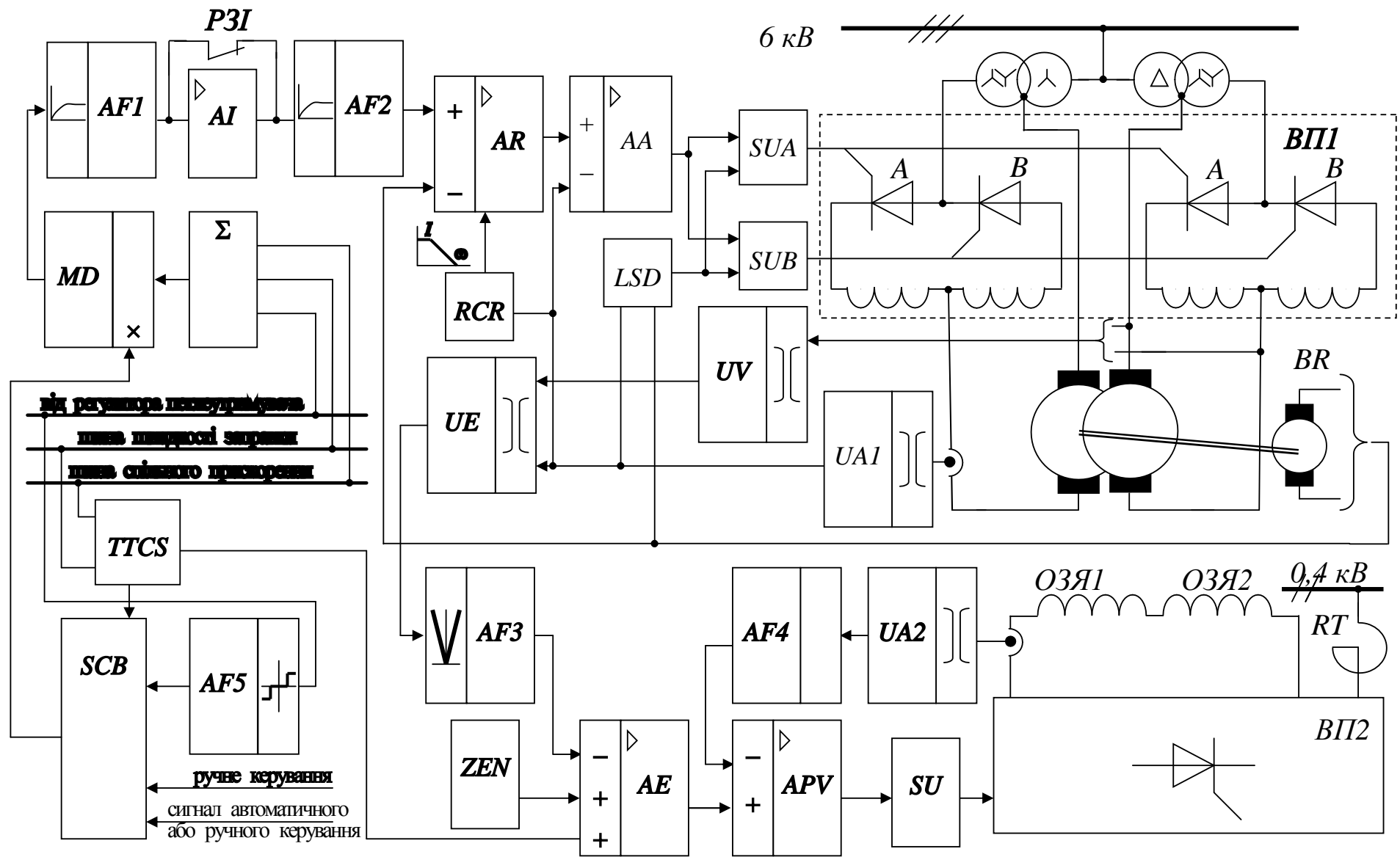


Рис.8.3. Електропривод кліті чистової групи неперервного стану гарячої прокатки

При регулюванні швидкості і послабленому потоку для запобігання перегрівання двигуна внаслідок зростання струму якоря передбачено струмообмеження, що регулюється блоком *RCR*, який знижує величину уставки струмообмеження пропорційно зменшенню потоку.

Електропривод чистової групи клітей. Електропривод чистової групи складається із електроприводів окремих клітей. Електроприводи окремих клітей є взаємопов'язаними через навантаження (метал) та канали керування. Канали керування (шини) є загальними для всіх електроприводів групи для забезпечення синхронності керування. Тому електропривод кліті отримує сигнали завдання на швидкість і прискорення від відповідних шин, як це показано на рис.8.3. При завданні певного режиму роботи (автоматичний або ручний) і отриманні сигналів від системи керування положенням відпайок трансформатора *TTCS* та регулятора петлетримувача через блок *AF5*, що забезпечує керування при заданій різниці між завданням на натяг та дійсним натягом металу у міжклітьовому проміжку, блок керування швидкості *SCB* масштабує через блок *MD* сумарний сигнал завдання на швидкість, що надходить від суматора Σ . Таке масштабування необхідне для забезпечення необхідного співвідношення між кутовими швидкостями валків сусідніх прокатних клітей. При цьому, як видно з рис.8.3, сумарний сигнал завдання враховує сигнали від шин швидкості заправки та прискорення, а також регулятора петлеутримувача.

Привод чистової групи розганяється одночасно по сигналу від шини заправної швидкості, а потім, після заправки смуги, розгін до основної швидкості прокатки і вище виконується з прискоренням, що визначається сигналом з шини прискорення.

Привод чистової групи має можливість регулювання швидкості окремих клітей для підтримки заданого натягу смуги. Крім того, за допомогою електропривода гвинтів, що натискають, забезпечується регулювання розхилу валків для отримання заданої товщини листа і усунення різнотовщинності.

8.3. Реверсивні стани холодної прокатки

Електропривод робочої кліті реверсивного стана холодної прокатки виконується в залежності від призначення стана, потужності, діаметра і кількості валків. Наприклад, якщо діаметр робочих валків більше 350...400 мм, то привод виконується зазвичай через робочі валки. При меншому діаметрі привод виконується через опорні валки.

Потужність двигунів кліті в залежності від призначення стана коливається в широких межах, від одиниць до декількох тисяч кВт.

При високій потужності (більше 1500 кВт) двигуни клітей можуть бути двоякірними, або використовується декілька одноякірних двигунів.

Привод може бути індивідуальним для кожного приводного валка, або груповим, редукторним або безредукторним.

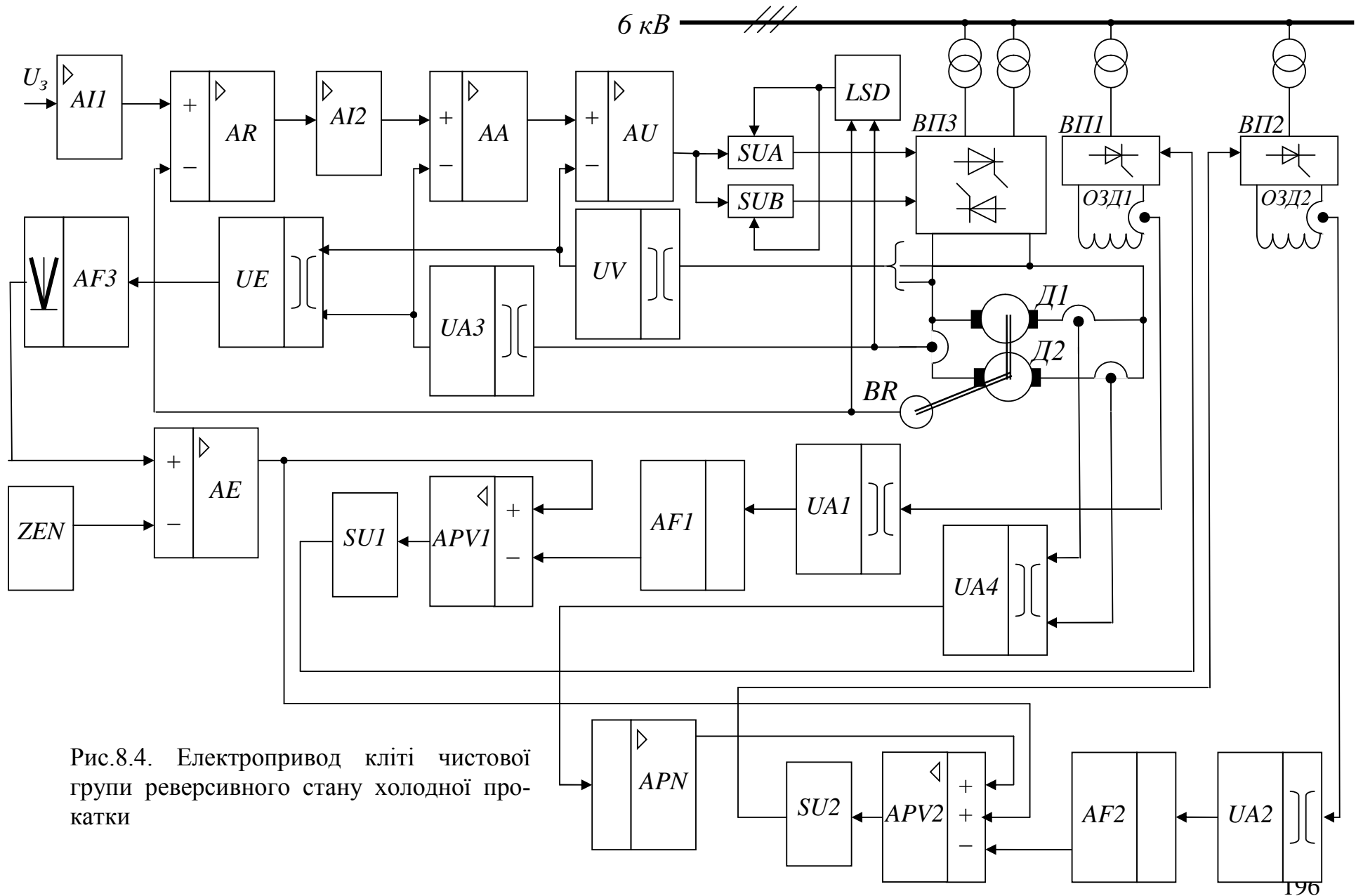


Рис.8.4. Электропривод кліті чистової групи реверсивного стану холодної прокатки

Індивідуальний привод має переваги перед груповим через відсутність шестеренної кліті, а також менший момент інерції і, відповідно, вищу швидкодію.

Вимоги до електропривода стана визначені у другому розділі.

Типова система електропривода реверсивного стана холодної прокатки показана на рис.8.4.

Привод стана груповий з двома приводними двигунами $D1$ і $D2$. Двигуни включені паралельно і мають живлення від вентильного реверсивного перетворювача $BПЗ$ із роздільним регулюванням мостами.

Система регулювання електропривода стана забезпечує розгін і гальмування кліті за лінійним законом зміни швидкості. Темп зростання і гальмування визначається задатчиком інтенсивності $AI1$.

Система регулювання має зовнішній контур швидкості, що включає регулятор швидкості AR і тахогенератор BR . ПІ-регулятор швидкості забезпечує астатизм регулювання швидкості шляхом форсуючої дії і компенсації механічної інерції привода.

Для забезпечення нормальної комутації при інтенсивному динамічному режимі роботи стана виконується обмеження похідної струму якоря двигунів за допомогою задатчика інтенсивності $AI2$.

Контур регулювання струму силового контуру живлення двигунів разом із ПІ-регулятором AA забезпечує задану якість перехідних процесів шляхом компенсації індуктивної інерційності силового кола і обмеження струму на певному заданому рівні.

Внутрішній контур напруги із пропорційним регулятором AU призначений для адаптації системи регулювання до зони переривистих струмів (див. третій розділ), зниження впливу зони нечутливості і зовнішніх збурень.

Вихідний сигнал регулювання з регулятора AU надходить на блоки імпульсно-фазового керування вентилями SUA та SUB . Керування вентильними мостами виконується незалежно за допомогою логічного пристрою переключення груп вентилів LSD .

Регулювання швидкості є двозонним. Вище основної швидкості регулювання забезпечується послабленням потоку при сталості ЕРС двигунів. ЕРС визначається датчиком ЕРС UE як алгебраїчна сума сигналів із датчиків струму силового кола $UA3$ і напруги UV . Сигнал, пропорційний ЕРС, через блок виділення модуля $AF3$ надходить на вхід регулятора ЕРС AE , де порівнюється із завданням на номінальну ЕРС від блока ZEN .

В схемі реалізована система індивідуального живлення обмоток збудження двигунів $D1$ і $D2$ відповідно від вентильних перетворювачів $BП1$ і $BП2$. Система управління збудженням кожного двигуна є двоконтурною.

Внутрішнім контурами є контури регулювання потоку із ПІ-регуляторами $APV1$ і $APV2$. Для визначення сигналу, пропорційного потоку відповідного двигуна, використовуються функціональні перетворювачі $AF1$ і $AF2$, які мають характеристику кривої намагнічування двигуна. Тому, отримуючи сигнали з датчиків струму намагнічування $UA1$ і $UA2$, на

виході функціональні перетворювачі формують сигнали, пропорційні потокам відповідних двигунів.

Зовнішнім контуром регулювання потоку двигунів є контур ЕРС. Вихідний сигнал інтегрального регулятора ЕРС (див. четвертий розділ) є загальним для контурів регулювання потоку кожного двигуна.

Для вирівнювання навантаження двох паралельно включених двигуна у колі збудження $D2$ використовується зворотний зв'язок за різницею струмів обох двигунів на основі датчика струму $UA4$. Принцип роботи системи вирівнювання навантаження регулюванням збудження і синтез регулятора вирівнювання навантаження АРН представлені у четвертому розділі.

8.4. Неперервні стани холодної прокатки

Для привода валків робочих клітей і моталок неперервних станів холодної прокатки використовують електроприводи постійного струму незалежного збудження з регулюванням поля у межах від 2:1 до 3:1.

Потужність привода однієї клітей доходить до 9000 кВт і вище при максимальній швидкості до 30 м/с. Двигуни виконуються у багатоякірному виконанні.

Привод валків кожної клітей індивідуальний.

Вимоги до електропривода неперервних станів холодної прокатки представлені у другому розділі.

Система живлення – від тиристорних перетворювачів із системою підпорядкованого регулювання параметрів.

Таким чином, система керування електроприводом клітей неперервного стана холодної прокатки є аналогічною до системи керування електропривода клітей неперервного стана гарячої прокатки (рис. 8.3).

Контрольні запитання

1. Описати схему регулювання частоти обертання головного електропривода реверсивного стана гарячої прокатки.
2. Для чого призначений регулятор ЕРС у схемі регулювання частоти обертання головного електропривода реверсивного стана гарячої прокатки, його структура?
3. Для чого призначені модулі ділення МД1 і МД2 у схемі регулювання частоти обертання головного електропривода реверсивного стана гарячої прокатки, його структура?
4. Для чого призначений регулятор ЕРС у схемі регулювання ЕРС двигуна головного електропривода реверсивного стана гарячої прокатки, його структура?
5. Описати схему регулювання ЕРС двигуна головного електропривода реверсивного стана гарячої прокатки.
6. Описати схему регулювання електропривода кліті чистової групи неперервного стана гарячої прокатки.
7. Для чого призначений блок регулювання обмеження регулятора швидкості у двохзонній системі регулювання швидкості?
8. У чому особливості електропривода чистової групи клітей неперервного стана?
9. Описати схему регулювання електропривода реверсивного стана гарячої прокатки.
10. Описати схему регулювання електропривода кліті чистової групи неперервного стана холодної прокатки.

ДОДАТКИ

Додаток А

ОБРОБКА МЕТАЛУ ТИСКОМ

Обробка металів тиском є важливим технологічним процесом металургійного виробництва. При цьому забезпечується не тільки додання злитку або заготовці необхідної форми і розмірів, але спільно з іншими видами обробки істотно поліпшуються механічні і інші властивості металів.

Прокатка, волочіння, пресування, кування, штампування є різними видами обробки металів тиском в пластичному стані.

Серед різних методів пластичної обробки прокатка займає особливе положення, оскільки даним способом проводять вироби, придатні для безпосереднього використання в будівництві і машинобудуванні (шпунт, рейки, профілі сільськогосподарського машинобудування і ін.). Прокаткам одержують також різноманітні види заготовок, які є висхідним матеріалом для інших способів обробки. Так, гарячекатана і холоднокатана листова сталь, смуги і стрічки у великих кількостях йдуть для листового штампування. При куванні в штампах як початковий продукт використовують переважно катану заготовку. Висхідним матеріалом при волочінні є катанка, одержувана на дротяних станах.

Термомеханічна обробка металу

Відомо, що пластична деформація і термічна обробка міняють властивості металів. Об'єднання цих операцій, максимальне їх зближення і створення єдиного процесу термомеханічної обробки забезпечують помітне підвищення механічних характеристик, що дозволяє економити до 15...40% металу, або збільшити довговічність виробів.

Поєднання пластичної деформації і термічної дії, метою якого є формування необхідної структури оброблюваного тіла, називають *термомеханічною обробкою* (ТМО).

При ТМО обидва процеси – пластична деформація і термічна обробка – можуть поєднуватися в як одній технологічній операції, так і проводитися з розривом за часом.

ТМО сталі виконується головним чином по трьох схемах: високотемпературна (ВТМО), низькотемпературна (НТМО) і попередня термомеханічна обробка (ПТМО).

ВТМО – термообробка з деформаційного нагріву з подальшою низькою відпусткою. Контрольована прокатка є різновидом ВТМО і ефективним способом підвищення міцності, пластичності і в'язкості низьколегованих сталей. Основна ідея цього виду обробки полягає в підборі режимів прокатки і охо-

лодження після прокатки, що забезпечує отримання дрібного і однорідного зерна в готовому прокаті. Найбільш успішно це досягається пониженням температури прокатки в останніх трьох — п'яти проходах до 780...850°C при збільшенні ступеню деформації до 15...20% і вище в одному проході.

НТМО полягає в нагріві сталі до 1000...1100°C, швидкому охолодженню до температури 400...600°C і високого ступеню (до 90% і вище) деформації при цій температурі. Після цього виконується загартовування на мартенсит і відпускання при 100.400°C. Цей спосіб застосовний до легованих сталей.

ПТМО характерна простотою виконання технологічного процесу: холодна пластична деформація, дорекристалізаційне нагрівання, загартовування з швидкісного нагріву, відпускання. При цьому перерва між холодною деформацією і нагрівом під загартовування не регламентується, що значно спрощує технологічний процес ПТМО.

Операція прискореного охолодження після прокатки або іншого виду пластичної деформації також є термомеханічною обробкою.

Прокатка металів

Прокатка металів є таким видом пластичної обробки, коли початкова заготовка обжимається валками прокатного стану, що обертаються, з метою зменшення поперечного перетину заготовки і надання їй заданої форми.

Існує три основні способи прокатки: подовжня; поперечна; поперечно-гвинтова (або коса).

При *подовжній прокатці* деформація заготовки здійснюється між валками, що обертаються в різні боки. Осі прокатних валків і оброблюваної заготовки паралельні (або перетинаються під невеликим кутом). Обидва валки обертаються в одному напрямі, а циліндрична заготовка – в протилежному. В процесі поперечної прокатки оброблювана заготовка утримується у валках за допомогою спеціального пристосування.

Обтиск заготовки по діаметру і надання їй необхідної форми перетину забезпечуються відповідною профілізацією валків і зміною відстані між ними. Даним способом виконують виробу, що є тілами обертання (кулі, осі, шестерні і ін.).

Поперечно-гвинтова або коса прокатка виконується у валках, встановлених в прокатній клітці під деяким кутом один до одного, що обертаються в одному напрямі. Стани косої прокатки використовують при виробництві труб, головним чином для прошивки злитка або заготовки в гільзу.

Хоча сортамент прокатних виробів вельми обширний, все ж таки представляється можливим весь прокат розбити на наступні основні чотири групи: *сортовий, листовий, труби, спеціальні види прокату (бандажі, колеса, періодичні профілі і ін.)*.

Найрізноманітнішою є група сортового прокату, який підрозділяється на *прості і фасони профілі*.

Прокат у вигляді кола, квадрата, смуг плоского перетину відноситься до простих профілів.

Прокат складного поперечного перетину відноситься до профілів фасонів. Залежно від призначення профілі фасонів підрозділяються на *профілі загального або масового споживання* (кутовий профіль, швелери, двотаврові балки, шестигранні профілі і ін.) і *профілі спеціального призначення* (рейки залізничні широкої і вузької колії, рейки трамвайні, профілі сільськогосподарського машинобудування, електропромисловості, нафтової промисловості і ін.).

Весь сортовий прокат підрозділяється на чотири групи: сталь *крупносортна, середньосортна, дрібносортна і катанка* діаметром від 5,5 до 9 мм.

Залежно від способу виробництва і товщини *листовий прокат підрозділяється на три основні групи*: гарячекатані товсті листи завтовшки 4 мм і більше, гарячекатані тонкі листи завтовшки менше 4 мм і холоднокатані листи всіх розмірів.

Листовий прокат із сталі і кольорових металів використовується в найрізноманітніших галузях промисловості. Тому листову сталь часто підрозділяють за призначенням, так, наприклад, зварювана корпусна сталь суднобудування, гарячекатана товстолистова конструкційна якісна вуглецева сталь товщиною від 4 до 14 мм і низьколегована сталь для котлобудування і судин, що працюють під тиском, рулонна холоднокатана сталь завтовшки 0,02—4 мм і ін.

Відповідно до держстандарту *труби*, що виготовляються на прокатних станах, підрозділяються на дві групи: *безшовні і зварні* (зі швом).

Крім круглих труб проводять також профільні труби і із змінними розмірами перетину по довжині.

До економічних профілів можна віднести тонкостінні і широкополічні балки, тонкостінні кутові профілі, швелери, гнуті профілі і ін.

Для серійного машинобудування має велике значення випуск періодичних профілів, використання яких забезпечує помітну економію металу (до 20...30%), підвищує продуктивність штампування.

Довгий час отримання готового прокату виконувалось по технологічній схемі "злиток — готовий прокат". В цих умовах одержували злиток невеликої маси. Вибрався він з таким розрахунком, щоб безпосередньо з нього можна було одержати необхідний виріб за один нагрів. Проте у міру розвитку машинобудування і металургії, головним чином високопродуктивних способів отримання сталі, виникла необхідність розливати сталь в злитки значної маси — 6...10 т і більше. Отримання готового прокату з такого злитка за один нагрів не завжди представляється можливим. З цієї причини почали будувати обтискові стани, задача яких полягала в обробці злитка в заготовку. Дана обставина привела до нової технологічної схеми: "злиток — напівпродукт (заготовка) — готовий прокат".

Прокатне виробництво металургійного заводу відповідно до цієї технологічної схеми включає систему станів, що забезпечують отримання напівпродукту у вигляді слябів, блюмів і інших заготовок, і систему станів, які випускають готовий прокат у вигляді сортової сталі, гарячий і холоднокатаних листів, стрічок, труб і ін.. Тому прокатні цехи, як правило, мають в своєму складі: обтискові (блюмінги, слябінги) і заготовні стани, сортові стани (рейкобалочні, крупно-, середньо-, дрібносортні і дротяні); листопрокатні стани; трубні стани і ін.

Разом з такою поширеною технологічною схемою спостерігається перехід до схеми "лита заготовка – готовий прокат". Цьому сприяє успішне освоєння розливання сталі в заготовки квадратного і прямокутного перетинів, що мало розповсюдження лише в кольоровій металургії.

Безперервне лиття сталевих заготовок тривалий час не застосовувалося через значні труднощі виконання технологічного процесу самого розливання. Проте цей процес забезпечує отримання хімічно більш однорідної щільної заготовки, що різко підвищує вихід готової продукції. Наприклад, на слябах спокійної вуглецевої сталі вихід готової продукції вище на 20%, ніж при розливанні у виливниці. Разом з тим виключається необхідність мати відділення підготовки виливниць і піддонів, а також стріперне відділення.

Вживання безперервного розливання сталі знижує собівартість металургійного переділу, оскільки при цьому усувається необхідність в дорогому устаткуванні обтискових цехів, виключаються витрати на утримання обслуговуючого і адміністративного персоналу. Встановлено, що собівартість прокату в цих умовах знижується на 8...10% при поліпшенні у багатьох випадках механічних властивостей і інших характеристик сталі.

Безперервним литтям сталі виготовляють сляби перетином до 300x2030, 300x2320 мм, квадратні заготовки перетином до 320x320 мм, а також круглих порожнистих трубних заготовок.

До основних технологічних операцій будь-якої технологічної схеми виробництва прокату слід віднести: підготовку вихідних матеріалів; нагрівання перед прокаткою (окрім холодної прокатки, коли, проте, часто потрібна інша операція – відповідна термічна обробка); гарячу і холодну прокатку; калібрування і виробництво гнутих профілів; обробку з операціями різання, правки, термічної обробки, видалення поверхневих дефектів і ін.

Волочіння металу

Волочіння металу — це протягування виробу круглого або фасонного профілю через отвір волочильного очка (волочу), площа вихідного перетину якого менше площі перетину початкового виробу. Волочіння виконується тяговим зусиллям, прикладеним до переднього кінця оброблюваної заготовки. Даним способом одержують дріт всіх видів, прутки з високою точністю поперечних розмірів і труби різноманітних перетинів.

Обробка металу волочінням знаходить широке вживання в металургійній, кабельній і машинобудівній промисловості. Волочінням одержують дріт з мінімальним діаметром 0,002 мм, прутки діаметром до 100 мм, при чому не тільки круглого перетину, труби, головним чином, невеликого діаметру і з тонкою стінкою.

Волочінням обробляють сталі різноманітного хімічного складу, прецизійні сплави, а також практично всі кольорові метали (золото, срібло, мідь, алюміній, і ін.) і їх сплави.

Вироби, одержані волочінням, мають високу якість поверхні і високу точність розмірів поперечного перетину. Якщо виробу необхідно додати, в основному, ці характеристики, то такий вид обробки називають *калібруванням*.

Волочіння частіше за все виконують при кімнатній температурі, коли пластичну деформацію більшості металів супроводжує *наклеп*. Цю властивість, в сукупності з термічною обробкою, використовують для підвищення деяких механічних характеристик металу.

Волочіння вигідно відрізняється від механічної обробки металу різанням (струганням), фрезеруванням, обточуванням і ін., оскільки при цьому відсутні відходи металу у вигляді стружки, а сам процес помітно продуктивніше і менш трудомісткий.

Волочінням можна виготовляти порожнисті і суцільні вироби часто складного поперечного перетину, виробництво яких іншими способами не завжди представляється можливим (наприклад, тонкі вироби, прутки значної довжини).

При волочінні ряду профілів (квадратний, трикутний, шестикутний і ін.) використовують складові волочі, які відрізняються високою універсальністю. У цьому випадку в одній і тій же волоці, міняючи профіль отвору відповідною перестановкою окремих пластин, можна одержувати різні розміри профілю.

При виробництві прутків і, головним чином, труб застосовують кулькові і роликові волочі. При отриманні профілів складної форми застосовують дискові волочі, в яких робочі поверхні волочильного каналу утворюються поверхнями дисків, що вільно обертаються (неприводних валів-роликів).

У якості вихідного матеріалу для волочіння застосовують катану і пресовану заготовки. При виробництві алюмінієвого, мідного і іншого дроту для початкової заготовки використовують катанку, одержувану безпосередньо з плавильної печі через кристалізатор і неперервний прокатний стан.

Незалежно від способу отримання початкова заготовка перед волочінням проходить ретельну попередню підготовку, яка полягає в проведенні того або іншого виду термічної обробки, видаленні окалини і підготовці поверхні для закріплення і утримання на ній мастила в процесі волочіння. Ці попередні операції забезпечують нормальне виконання пластичної деформації у волочильному отворі, сприяють отриманню високої якості поверхні виробу, зме-

ншують зусилля і енергію на волочіння і знижують знос волочильного інструменту.

Термічна обробка металу перед волочінням знімає наклеп, додає металу необхідні пластичні властивості, забезпечує отримання самої оптимальної структури. Тому термічну обробку вибирають такою, щоб в поєднанні з пластичною деформацією вона забезпечувала максимальні механічні і інші характеристики оброблюваного виробу.

Залежно від хімічного складу металу і призначення продукту волочіння застосовують відпал, нормалізацію, загартовування, патентування.

Патентування застосовують для вуглецевих сталей. Процес патентування полягає в нагріві металу вище за критичну точку і охолодженні його при температурі 450...500°C. Для такого гартівного середовища використовують розплавлений свинець або солі.

У процесі отримання готового виробу волочінням термічну обробку для зняття наклепа і поліпшення структури металу можна виконувати кілька разів залежно від розмірів початкового і кінцевого продуктів обробки і остаточних його якісних показників. Готовий продукт теж можна піддавати остаточній термічній обробці в цілях додання металу необхідних механічних властивостей і структури.

При виробництві дроту і прутків волочінням велику увагу надають підготовці поверхні продукту обробки перед волочінням. Видалення окалини в калібрувальних і волочильних цехах проводять механічним, хімічним і електрехімічним способами, а також комбінаціями цих способів.

При механічному очищенні поверхні від окалини дріт або пруток піддають періодичним перегинам в різних площинах між роликками, після чого метал поступає на завершальну стадію очищення сталевими щітками. Такий спосіб економічно доцільний, придатний для очищення поверхні головним чином з вуглецевої сталі, окалина якого при перегибах порівняно легко руйнується і обпадає.

З механічних способів, що забезпечують достатньо успішне очищення поверхні металу, вживається дробоструменева обробка. Під дією ударів дробу з вибіленого чавуну, сталевого лиття або високоміцного дрібно нарізаного сталевого дроту окалина на поверхні оброблюваного виробу розпушується і видаляється. Цей спосіб очищення поверхні металу від окалини у багатьох випадках не вимагає травлення і найбільш часто застосовується в калібрувальних цехах.

Хімічні способи видалення окалини набули широке поширення завдяки своїй надійності, хоча вони менш економічні в порівнянні з механічними способами. Травлення вуглецевих і ряду легованих сталей проводять в сірчаній або соляній кислотах. Високолеговані сталі (кислототривкі, неіржавіючі і ін.) травлять в сумішах кислот (сірчана і соляна, сірчана і азотна і ін.). Мідь і її сплави травлять в 5...10%-ній сірчаній кислоті при температурі 30...60°C.

Травлення металу в кислотах для очищення від окалини зазвичай проводять з додаванням у ванну присадок (інгібіторів травлення), які значно зменшують швидкість розчинення основного металу, але не впливають на швидкість розчинення окалини, що запобігає перетравленню. Крім того, присадки знижують дифузію водню в метал, зменшують загазованість травильних відділень, покращують умови праці.

Безпосередньо після травлення метал ретельно промивають для видалення залишків розчину кислоти, солей заліза, шламу, травильної присадки, бруду. Промивку проводять негайно після травлення, оскільки затримка веде до висихання травильної рідини і виділенню складнорозчинних солей заліза.

Зазвичай промивку ведуть спочатку в гарячій воді, що забезпечує інтенсивне розчинення солей, а потім для кращого видалення шламу – в струмені холодної води з шланга під тиском близько 0,7 МПа.

Після видалення окалини наносять підзмащувальний шар, який повинен добре утримувати мастило при волочінні і сприяти запобіганню налипання металу на робочу поверхню волочи.

Після травлення, промивки, нанесення підзмащувального шару метал сушать в спеціальних камерах при циркуляції повітря температурою 300...350°C. Сушка видаляє вологу, а також усуває можливу травильну (водневу) крихкість, яка може виникнути від того, що частина водню, що утворюється при травленні, дифузує в метал і викликає погіршення його пластичних властивостей.

Всі операції по підготовці поверхні металу до волочіння виконують в спеціальному ізольованому приміщенні. Для травлення і обробки поверхні дроту і прутків існують травильні машини періодичної і безперервної дії. Обробка в машинах безперервної дії забезпечує травлення виробів будь-яких перетинів. Цей спосіб є найпрогресивнішим, оскільки в безперервному процесі можна поєднувати термічну обробку, видалення окалини і нанесення підзмащувального шару. Така потокова обробка забезпечує повну автоматизацію процесу, підвищує якість металу, знижує трудомісткість операцій.

Після процесу волочіння прутки крім термічної обробки у багатьох випадках правлять, шліфують, полірують і залежно від призначення наносять на них захисні покриття, наприклад, цинкуванням, лудінням, хромуванням, кадміюванням, лакуванням і ін.

Правку зазвичай виконують на роликотравильних машинах, які встановлюють в потоці виробництва, або окремо.

Шліфування на глибину до 0,15...0,30 мм поверхні прутков, що калібруються, використовується для видалення поверхневих дефектів, зняття зневуглецьованого шару, додання точних розмірів поперечному перетину прутка і ін.

Для регламентації технологічних операцій складаються технологічні карти, в яких розписаний весь технологічний процес по підготовці металу до

волочіння, маршрут волочіння, способи початкової, проміжної і остаточної термічних обробок, операцій обробки і ін.

Пресування металу

Пресування металу – це витіснення за допомогою пуансона металу початкової заготовки (частіше всього циліндрової форми), поміщеної в контейнер, через отвір матриці.

Цей спосіб пластичної обробки знаходить широке вживання при деформації металів як в гарячому, так і в холодному стані, а також для обробки металевих порошків і неметалевих матеріалів (пластмас і ін.).

Пресуванням виготовляють прутки діаметром 3...250 мм, труби діаметром 20...400 мм при товщині стінки 1,5...12 мм, порожнисті профілі з декількома каналами складного перетину, із зовнішніми і внутрішніми ребрами, різноманітні профілі з постійним або змінним (плавно або східчасто) перетином по довжині. Профілі для виготовлення деталей машин, несучих конструкцій і інших виробів, вироблені пресуванням, часто виявляються більш економічними, ніж ті, що виготовляються прокаткою, штампуванням або відливанням з подальшою механічною обробкою. Крім того, пресуванням одержують вироби вельми складної конфігурації.

До *основних переваг пресування металу* відносяться: можливість успішної пластичної обробки з високими витяжками, у тому числі малопластичних металів і сплавів; можливість отримання практично будь-якого поперечного перетину виробу, що при обробці металу іншими способами не завжди вдається; отримання широкого сортаменту виробів на одному і тому ж пресовому устаткуванні із заміною тільки матриці; виробництво виробів з високими якістю поверхні і точністю розмірів поперечного перетину, що у багатьох випадках перевищує прийнятну точність при пластичній обробці металу іншими способами (наприклад, при прокатці).

До *недоліків процесу пресування* слід віднести: підвищена витрата металу на одиницю виробу через істотні втрати у вигляді прес-залишку; поява в деяких випадках помітної нерівномірності механічних і інших властивостей по довжині і поперечному перетину виробу; порівняльно високу вартість пресового інструменту.

Процес пресування виконується в умовах нерівномірного всестороннього стиснення металу, що позитивно позначається на збільшенні його пластичності. Тому пресуванням можна обробляти метали і сплави з низькою природною пластичністю. Проте тривісне стиснення викликає необхідність значних зусиль при обробці. Тому пресування вимагає підвищеної витрати енергії на одиницю об'єму тіла, що деформується.

Кування і штампування металу

Кування і штампування металу включає такі процеси, як кування, об'ємне гаряче штампування і штампування листового і пруткового матеріалу в холодному стані.

При куванні деформація заготовки здійснюється за допомогою універсального підкладного інструменту або бойків.

Бойки частіше за все бувають плоскими, проте застосовують вирізні і закруглені бойки. Нижній боек зазвичай нерухомий, верхній виконує поворотно-поступальну ходу.

В результаті багатократної і безперервної дії інструменту заготовка поступово набуває необхідну форму і розміри.

При об'ємному штампуванні додання заготовці заданої форми і розмірів здійснюється шляхом заповнення металом робочої площини штампу.

Листове штампування є таким видом пластичної обробки металу, коли для отримання деталей типу ковпачків, втулок і інших у якості вихідного матеріалу використовують лист або стрічку. При цьому обробка виконується без значної зміни товщини заготовки.

Даними способами одержують вельми різноманітні формою і розмірам виробу з металу, пластмас і інших матеріалів з різними ступенем точності розмірів, механічними і іншими характеристиками і якістю поверхні. Тому кувально-штампувальне виробництво знаходить широке вживання в машинобудуванні і приладобудуванні, у виробництві предметів народного споживання і інших галузях народного господарства.

Отримання виробів куванням і штампуванням дозволяє максимально наблизити початкову форму заготовки до форми і розмірів готової деталі і, тим самим, зменшити, або повністю виключити дорогі операції з втратою металу в стружку.

БЛЮМІНГ 1150 ДНІПРОВСЬКОГО МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМБІНАТУ

Блюмінг двохвалковий реверсивний одноклітьовий введений в експлуатацію у 1953 р. і призначений для прокатки злитків вагою 7...10 тон у блюми перетином (270-295) x (300-510) мм для трубозаготовочного стану, сляби перетином (120-270) x (500-1050) для універсального стану комбінату і товарні, осьові і ковальські заготовки перетином 265 x 265, 300 x 300, 350 x 350 мм. Проектна потужність блюмінга 3,7 млн. т/год. В 1956 р. на блюмінгу вперше освоєна технологія одночасної прокатки двох злитків і в даний час на стані, як правило, ведеться двухслитковая прокатка.

Устаткування стану загальною масою 2100 т розташовано в подовжніх прольотах з переходом в трубозаготовочний стан 900/750. Паралельно з блюмінгом розташований універсальний стан 1200.

Підготовка металу до прокатки

Початкові заготовки – злитки вагою 7,7...3,6 тон доставляють безпосередньо з мартенівського і киснево-конвертерного цехів в гарячому стані і зі складу холодних злитків на платформах. Типи слиткових розмірів і маси наведені в табл. В.1.

Таблиця В.1

Типи і параметри злитків, прокатуваних на блюмінгу 1150

Сталь	Тип злитка (виливниці)	Розміри перетину, мм		Висота, мм	Маса, т
		верхнього	нижнього		
Спокійна	С-8	780 x 700	675 x 595	2260 + 520	8,2
	Л-10	605 x 1125	525 x 1065	2055 + 600	9,6
Кипляча, на- півспокійна	23	560 x 1070	615 x 1125	2100	8,93
	Н1:1	723 x 638	800 x 725	2155	7,7
Спокійна	Н1:1	723 x 638	800 x 725	2280 + 350	8,21

Нагрівають злитки в нагрівальних колодязях регенеративного типу.

До посаду у нагрівальні колодязі допускаються злитки заввишки $\geq 1,5$ м в гарячому стані (з температурою ≥ 605 °С), теплому (305...600 °С) і холодному (< 300 °С).

У цеху 13 груп колодязів, по чотири осередки в кожній групі і місткістю одного осередку п'ять-вісім злитків залежно від їх маси. Газ і повітря підігрівають до 800-900 °С. Максимальна теплова потужність одного осередку 15804-18850 кДж/ч.

Садять і видають злитки з колодязів п'ятьма колодязними кранами з кліщовими пристроями. Транспортують нагріті злитки до приймального рольгангу стана злитковозним візком з перекидачем, рухомим по прямолінійному шляху в човниковому режимі. В зчепленні із злитковозом може працювати транспортний візок, на який укладається до двох злитків. З перших груп колодязів злитки першим колодязним краном подають безпосередньо на приймальний рольганг або в стаціонарний перекидач з циклом перекидання 3,0...3,5 с. Вантажопідйомність злитковоза 20 т, швидкість пересування 10 м/с. Для повороту злитків на 180° використовують поворотний стіл діаметром 3,2 м, частотою обертання 7,5 об/мин. Час транспортування злитків від колодязів до валків стана ≤ 6 хв.

Устаткування стана і технологічний процес прокатки

Станини робочої кліті литі, закритого типу з відстанню між осями 3370 мм. Максимальний діаметр робочих валів 1150, мінімальний 1050 мм, довжина бочки 2600 мм. Матеріал валів - кована сталь 50ХН, підшипники валів текстолітові.

Привод валків від електродвигуна типу МП (8840 кВт, 0...65-90 об/хв). Валки шестерінчастої кліті шевронні з діаметром початкового кола 1365 м. Діаметр універсальних шпінделів 500 мм, довжина – 5955 мм.

Натискний пристрій забезпечує швидкість підйому верхнього валу 180 мм/с, максимальний підйом 1070 мм. Привод натискного пристрою від двох електродвигунів постійного струму (200/900-кВт, 500/750/1000 об/мин). Урівноваження верхнього валу гідравлічне.

Маніпулятор рейкового типу з одностороннім розташуванням приводу. Висота лінійок 1050 мм, робочий хід 2650 мм, швидкість пересування 0,9-1,8 м/с. Привод від чотирьох електродвигунів типу МП (75 кВт, 1040 об/хв) через двухступеневий редуктор з передавальним відношенням 23,3.

Кантувач чотирикрюковий з редуктором, що гойдається, переміщення крюків у вертикальному напрямі 1045 мм, час кантівки 2 с. Привод від електродвигуна типу МП (75 кВт, 520 об/хв) через редуктор з передавальним відношенням 23,3.

Рольганги перед поворотним столом у транспортного перекидача і підвідний за поворотним столом секції: діаметр роликів 350 мм, довжина бочки 1400 мм, крок 700 мм, швидкість транспортування по них $\leq 1,5$ м/с.

Передній рольганг розкату і робочі рольганги перед і за кліттю блюмінга: діаметр роликів 450 мм, довжина бочки 2700 мм, крок 750 мм, швидкість транспортування по них $\leq 1,82$ м/с.

Прокатку на блюмінгу ведуть за 11...17 проходів залежно від перетину злитка і групи сталі.

В табл. В.2 наведені режими обтиску злитка С-8 в сляб перетином 120 х 510 мм і блюмовий розкат 300 х 400 мм відповідно за 13 і 11 проходів. Температура кінця прокатки ≥ 1050 °С.

Від робочої кліті блюмінга розкат подають по рольгангу до ножиць зусиллям 10 мН.

Таблиця В.2

Режими обтиску злитків типа С-8 перетином 780 х 700 мм

Прохід, калібр	Перетин, мм		Обтиск, мм	Прохід, калібр	Перетин, мм		Обтиск, мм
	товщина	ширина			товщина	ширина	
1-I	680		100	1-I	680		100
2*	620	710	60	2*	600	710	80
3-I	620		90	3-I	600		110
4	560		60	4	520		80
5	500		60	5	450		70
6	440		60	6*	380	640	70
7	380		60	7-III	570		70
8*	320	670	60	8	500		70
9-II	555		115	9	430		70
10*	440	350	115	10*	370	420	60
11-I	250		110	11-I	300	400	120
12	180		70				
13	120	510	60				

* Кантівка після проходу.

При одночасній прокатці двох злитків зазор між ними витримують мінімальним; надійність захоплення другого без тих, що пробуксували, і ударів забезпечують підбором відповідного числа оборотів валів. Кантують два розкати одночасно, а якщо розкат довше за лійки, то кожний розкат кантують окремо.

Для поліпшення захоплення і зменшення зносу на дно калібрів I і III наносять насічку; накатку дна калібрів II і IV ведуть рифленим роликом, а буртів всіх калібрів – гладким роликом з твердої сталі.

Стійкість валків за одну установку 150 тис. тон металу. Перевалювання валків на стані проводять за допомогою спеціального візка.

Устаткування ділянок і технологія зачистки, порізу, охолодження і прибирання прокату

Гарячий блюмовий і слябовий розкат ріжуть на мірні довжини, видаляють головну і донну частини ексцентриковими ножицями з нижнім різом зусиллям різання 10 МН, довжиною ножа 1200 мм, ходом 500 мм, частотою різання 6-10 різів/хв. Розкрій ведуть, використовуючи пересувний упор і розмірні лінійки.

Весь метал, прокатаний на блюмінгу, розділяється на три потоки: товарна продукція – сляби завширшки > 630 мм, квадратна заготовка перетином $\geq 300 \times 300$ мм; розкат, що передається на склад трубозаготівельного стана; розкат, що йдуть транзитом на трубозаготівельний стан.

Товарну продукцію і сляби для універсального стана ріжуть на довжини, обумовлені замовленнями; розкат, що передається на склад, - на довжини 3...6 м. Для розкату, що йде транзитом на трубозаготівельний стан, довжина частини смуги не обмежується.

Обрізь забирається конвейером із швидкістю пересування ланцюга 0,1 м/с. Ширина жолоба 1700 мм, максимальна маса обрізка, що транспортується, 0,9 т.

Блюми і сляби клеймлять використовуючи клеймовочну машину за ножицями гарячого різання. Готова продукція і розкат, що надходять на склад, передають з рольганга на транспортери двома зіштовхувачами рейкового типу з максимальним зусиллям 40 кН, робочим ходом 2850 мм, швидкістю 0,45 м/с.

На склад для вторинного нагріву металу до печей стана 900/750 розкат подають чотирма великими ланцюговими транспортерами з одночасним завантаженням до 37 т. Крок захоплення транспортера 2,4 м, швидкість подачі 0,25 м/с, довжина перенесення блюма – 25,6 м. З транспортерів метал знімається електромостовими кранами. Блюми вуглецевих сталей звичайної якості з транспортера укладають для охолодження в штабелі або, для прискореного охолодження, на вільний стелаж зачистки.

Заготовку з осьової сталі перетином 265 x 265, 300 x 300, 350 x 350 мм з транспортерів перекладають в гарячому стані в коробки сповільненого охолодження або ями і охолоджують за спеціальною технологією 24...56 ч залежно від марки сталі.

НЕПЕРЕРВНИЙ СТАН 250 ЄНАКІЇВСЬКОГО МЕТАЛУРГІЙНОГО ЗАВОДУ

Неперервний дротяний стан 250 призначений для чотирьохниткової прокатки катанки діаметром 5-10 мм.

Загальна потужність головних приводів робочих клітей 29620 кВт.

Проектна продуктивність стану 800 тис. т в рік.

У даний час на стані прокатують сталь діаметром 8, 9, 10, 11 мм (ГОСТ 2590-88; ГОСТ 14085-79); сталь для армування залізобетонних конструкцій (періодичну) № 8 № 10 (ГОСТ 5781-82), із сталі звичайної якості (ГОСТ 380-88, ГОСТ 5781-82; 35ГС; 25Г2С); якісної (ГОСТ 1050-88: 10-50, ГОСТ 1414-75: А12, А20).

Підготовка металу до прокатки

Початкові заготовки перетином 80 x 80 мм, завдовжки 10,5-12 м, надходять з неперервно-заготовного стана заводу в зачищеному стані.

Заготовки електромостовими кранами подають на завантажувальні пристрої, що складаються із стелажу, ланцюгового транспортера, дозатора, автоматичних установок, спускових плит і амортизацій.

Завантажувальних пристроїв два, на них здійснюється прийом із складу, транспортування і поштучна подача заготовок на завантажувальний рольганг. Максимальне число заготовок на транспортері 100-120. Швидкість транспортера 0,082 м/с. Темп видачі заготовок на рольганг 320 шт/ч. Привод транспортера 30 кВт, 716 об/хв.

Заготовки до печі подають завантажувальним 10-секційним рольгангом, обладнаним кантувачем, скидувачем заготовки і кінцевим упором. Загальна довжина рольганга 112 м, окружна швидкість 2,8 м/с. Привод роликів індивідуальний 14 кВт, 460 об/хв.

Для прибирання відбракованих заготовок в кишеню в пічному прольоті по ходу технологічного процесу встановлений скидувач бракованого металу із швидкістю 0,8 м/с, що приводиться від електродвигуна 5кВт, 920 об/хв.

Передаються заготовки від подаючого рольганга до вікон завантаження печей одним з двох спеціальних транспортерів з ритмом подачі 23 с, привод транспортера 30 кВт. Швидкість переміщення ланцюгів 0,48 м/с.

Для подачі заготовок від рольганга безпосередньо біля печі в методичну піч встановлений Зіштовхувач у вигляді двох задаючих роликів. Зусилля зштовхування 3,5 кН, привод 12 кВт, 760 об/хв. Швидкість зштовхування 1,57 м/с.

Посаджені в піч заготовки пересуваються кривошипно-шатуновим што-вхачем із зусиллям штовхання 1,0 МН. Хід штовхаючих штанг 530 мм. Привод 46 кВт, 610 об/мин.

Стан обслуговують дві двозонні з похилим монолітним черенем методи-чні печі, розташовані під невеликим кутом до головної осі стану. Продуктив-ність однієї печі 110 т/ч. Печі з бічним завантаженням і видачею заготовок працюють на коксівному газі тиском до 40 кПа, теплою згорання 18,2 МДж/м³.

Устаткування стану і технологічний процес прокатки

Під час пуску стан мав 37 робочих клітей, які з'єднані в чотири безперер-вні групи. Чорнова група – дев'ять горизонтальних клітей; перша проміжна група – чотири горизонтальні кліті (в цих групах прокатки ведеться в чотири нитки); друга проміжна група – дві нитки по чотири горизонтальні кліті в ко-жній; чистова група - чотири нитки по дві горизонтальних і по дві вертикаль-ні кліті.

У даний час стан має 29 робочих клітей, оскільки в кожній з чотирьох чистових груп вертикальні кліті № 19 і горизонтальні кліті № 20 замінені пет-левими столами. Максимальна швидкість прокатки 8-мм катанки 30 м/с.

Станини горизонтальних клітей закритого типу. Натискний пристрій верхнього валу виконаний із приводом від двох електродвигунів (кожний гвинт – від одного електродвигуна), швидкість пересування гвинтів в горизо-нтальних клітях 0,065 мм/с (кліті № 1-№ 17) і 0,101 мм/с (кліті № 18 і № 21). Нижній вал у вертикальній площині регулюється на стенді уручну за допомо-гою прокладок необхідної товщини залежно від діаметру валів. Урівноважен-ня верхніх валів пружинне.

Основні параметри робочих клітей і лінії приводу стану наведені в табл. С.1.

Матеріал валів - чавун: СШХН з НВ 315-407 (кліті № 1-№ 9); СПХН з НВ 424-506 (кліті № 10-№ 17); СПХН з НВ 448-522.

Всі робочі валки встановлені на підшипниках рідинного тертя. Осьове регулювання валків ± 10 мм (кліті № 1-№ 17) і $\pm 7,5$ мм (кліті № 18 і № 21).

Пересування робочої кліті при зміні калібру ± 300 мм (кліті № 1-№ 17); ± 180 мм (кліть № 18).

Швидкість пересування кліті 3,74 мм/с (кліті № 1-№ 17); 2,1 мм/с (кліті № 8-№ 17); 1,212 мм/с (кліть № 18).

Привод валків кожної кліті, окрім двох пар клітей (№ 2 і № 3), (№ 4 і № 5) від індивідуального електродвигуна через редуктори (кліті № 1-№ 9) і шес-терінчасті кліті. Привод валів клітей № 10-№ 18 і № 21 безредукторний, а клі-тей № 18 і № 21 – без шестерінчастих клітей, індивідуальний.

Таблиця С.1

Параметри робочих клітей і лінії привода дротяного стану 250

Кліть	D_6^{max} , мм	D_6^{min} , мм	L_6 , мм	$D_j^{ш.6}$, мм	$N_{ел.дв}$, кВт	$n_{ел.дв}$, об/мин	$M_{пр}^{max}$, кН·м	$P_{пр}^{max}$, кН
1	490	440	1000	450	740	620/600	156	1720
2-7	490	440	1000	450	1470	500/1100	156	1720
8; 9	370	335	1000	350	2000	350/720	19	1300
10-13	330	292	800	300	1470	500/1100	19	700
14-17	330	295	600	300	740	620/1600	19	700
18	260	230	400	-	450/159	700/2000	1,65	70
21	260	230	400	-	450	3909	1,65	70

Умовні позначення:

D_6^{max} – максимальний діаметр валків;

D_6^{min} – мінімальний діаметр валків;

L_6 – довжина валків;

$D_j^{ш.6}$ – діаметр шейки валка;

$N_{ел.дв}$ – потужність електродвигуна головного привода кліті;

$n_{ел.дв}$ – швидкість електродвигуна головного привода кліті;

$M_{пр}^{max}$ – момент прокатки максимальний;

$P_{пр}^{max}$ – зусилля на валки максимальне.

Видані з печі заготовки за допомогою перевідних стрілок розподіляються з першої печі на третю і четверту нитки, а з другої печі – на першу і другу нитки. Заготовки від печі № 2 (що знаходиться далі від стану) рухаються по рольгангу завдовжки 16 м із швидкістю 4,6 м/с. Далі цей рольганг переходить в швидкісній 17-ти метровий із швидкістю транспортування металу 4,8 м/с. Такий же швидкісний рольганг з'єднує піч № 1 із станом. Проштовхуючі кліті (діаметр валків до 335 мм) із зусиллям проштовхування 50 кН і швидкістю 0,1-0,7 м/с, що приводяться від двигуна 32 кВт, 730 об/хв подають заготовки до розподільного барабана, який по черзі спрямовує їх у один з чотирьох калібрів. Діаметр барабана 1200 мм; привод від електродвигуна 7,5 кВт, 695 об/хв через редуктор з передаточним числом 40,17.

За чорною групою клітей на кожній нитці встановлені аварійні летючі ножиці для обрізання передніх кінців і для порізу розкату на габаритні довжини у разі аварії у подальших клітях стану. Максимальний розрізаючий перетин розкату 425 мм^2 ; швидкість руху металу 1,78-6,24 м/с; температура розрізаючої смуги 800-900 °С. Зусилля різання 30 кН. Максимальна довжина відрізаного шматка 1,7 м. Привод ножиць від електродвигуна 32кВт, 760 об/хв. Під ножицями встановлений транспортер прибирання обрізі, куди вона скачується по жолобу. Максимальна продуктивність транспортера 60 кг/с. Швидкість транспортера 0,12-0,98 м/с; привод від електродвигуна 10кВт, 760 об/хв.

Прокатка на стані здійснюється з деяким натягом між клітями. Між другими проміжними групами клітей і чистовими розташовані вертикальні петлеутворювачі. Між передчистою № 18 і чистою № 21 клітями встановлені горизонтальні петлеві столи.

Температура прокатки після кліті № 3 повинна бути $\geq 1000 \text{ °С}$. Прокатку всіх профілів і марок сталі ведуть тільки з прискореним охолодженням.

Температура металу при змотуванні готового профілю в бунт повинна бути $\leq 800 \text{ °С}$ для сталі товщини 8-10 мм і періодичний профіль № 10 $\leq 900 \text{ °С}$ для сталі товщини 11 мм $\leq 770 \text{ °С}$ для періодичного профілю № 8.

Прокатки сталі діаметром 8 і 9 мм ведуть у всіх 19 клітях; діаметром 10 і 11 мм – в 17 клітях (не працюють кліті № 14 і № 15).

Калібрування валів чорної групи: шестикутник – квадрат; першої проміжної групи: овал – ребровий овал – овал – квадрат; другої проміжної групи: овал – ребрової овал; чистої групи: овал – круг.

Основні параметри калібрування валів круглої сталі діаметром 8,0 мм, а також параметри лінії приводу валів наведені в табл. С.2.

Таблиця С.2.

Параметри калібрування сталі діаметром 8,0 мм
із заготовки перетином 80 x 80 мм і лінії приводу клітей дрютяного стана 250

Кліть	Калібр	H_p , мм	B_p , мм	D_k , мм	$n_{ел.дв}$, об/хв	n_v , об/хв	$v_{пр}$, м/с	i_p
1	6-кутовий	53	98	454	642	12,7	0,303	50,5
2	6-кутовий	43	101	455	778	16,2	0,387	48
3	Квадратний	66	64,1	449	774	23,4	0,55	33
4	6-кутовий	28	68	463,5	806	32,8	0,795	24,5
5	Квадрат	45	45,7	459	811	48	1,15	16,9
6	6-кутовий	19	51	470	654	62	1,54	10,52
7	Квадрат	33	29,5	465,5	618	87	2,12	7,11
8	6-кутовий	15	36	363,5	415	152	2,9	2,75
9	Квадрат	24	19,7	357,5	330	183	3,43	1,85
10	Овал	12,8	29	323	252	252	4,27	-
11	Рибровий овал	19	16,3	316,8	298	298	4,96	-
12	Овал	9,5	23	325,7	428	428	7,28	-
13	Квадрат	16	16		323	496	8,37	-
14	Овал	8,5	18	327	648	648	11,1	-
15	Рибровий овал	13	11	324	815	815	13,8	-
16	Овал	7,1	13	326,5	967	967	16,55	-
17	Рибровой овал	11	8,7	324,3	1135	1135	19,3	-
18	Овал	6	13	247,4	1630	1630	21,1	-
21	Круг	8	8,1	255,1	2020	2020	27,0	-

Умовні позначення:

H_p – товщина розкату;

B_p – ширина розкату;

D_k – діаметр калібру;

$n_{ел.дв}$ – кутова швидкість електродвигуна головного приводу кліті;

n_v – кутова швидкість валків;

$v_{пр}$ – лінійна швидкість прокатки;

i_p – передаточне число редуктора.

Устаткування ділянок і технологія охолодження прокату

Після чистої групи розкат, проходячи трасу охолодження і трайб-апарати, подається на роторні моталки. Розміри роликів трайб-апарату: максимальний діаметр: верхні – 300 мм, нижні – 460 мм, довжина 130 мм. Привод роликів від електродвигуна 19кВт, 3000 об/хв.

На кожен чистової групи встановлено по дві моталки. Електродвигуни водила моталки і трайб-апарату працюють синхронно з електродвигуном кліті № 21. Катанка до моталок подається по провідних трубках і, пройшовши через знімну проводку, яка встановлюється в порожньому валу моталки, потрапляє в жолоб водила. При обертанні останнього катанка розкидається по колу. Бунт формується в просторі, обмеженому зовнішнім і внутрішнім діаметром барабана.

На моталці може змотуватися катанка діаметром 6-12 мм. Максимальна швидкість змотування 38 м/с. Швидкість переміщення барабана 0,5 м/с. Привод верхнього механізму від електродвигуна 140 кВт, 600 об/хв. Швидкість обертання валу моталки 300-1500 об/хв. Розміри бунту: зовнішній діаметр 1400 мм, внутрішній – 900 мм.

Після остаточного формування (змотування) бунту останній виштовхується з моталок на пальцевий транспортер: зусилля зштовхування 66 кН, швидкість зштовхування бунту 1,2 м/с, цикл зштовхування 9 с. Привод механізму зштовхування бунтів від електродвигуна 11 кВт, 950...2500 об/хв.

Пальцевий транспортер призначений для циклічного транспортування бунтів від моталок до передавачів бунтів. Швидкість транспортування бунтів 0,324-0,648 м/с, одночасно транспортують до п'ять бунтів. Привод транспортера від електродвигуна 46 кВт, 610 об/хв.

Бунти по пальцевому транспортеру надходять до бунтов'язальних машин для двосторонньої ув'язки, яка здійснюється в двох місцях дротом діаметром 5...6,5 мм. Цикл роботи машини 8 с. Частота обертання при в'язці 2...3 об/с. Швидкість подачі дроту 1,5 м/с. Привод обертання бунтов'язальної машини потужністю 160 кВт, 590 об/хв. При виході з ладу бунтов'язальних машин бунти пов'язують уручну на спеціально обладнаному майданчику в кінці пластинчастого транспортера. Пов'язані бунти з пальцевого транспортера передають на пластинчастий транспортер передавачем бунтів. Швидкість транспортування бунтів по передавачу 0,245 м/с, шлях транспортування 1,8 м.

Пластинчастий транспортер призначений для охолодження бунтів до температури, при якій бунт не деформується в підвішеному стані. Цей же транспортер передає бунти від в'язальних машин до крюкового конвейера. Бунти рухаються по сталевих плитах за допомогою ланцюга. По пластинчастому транспортеру бунти транспортують до зіштовхувача з підвішувачем, який навішує бунти на крюковий конвейер. Зусилля штовхання зіштовхувача 15 кН. Робочий хід штанги 3 м. Швидкість штовхання 0,26 м/с. Кут нахилу

підвішувача 60° . Час подвійного ходу столу 6...9 с. Привод зіштовхувача від електродвигуна 16 кВт, 160 об/хв. Привод підвішувача від електродвигуна 12 кВт, 760 об/хв.

Крюкової конвейєр слугує для остаточного охолодження бунтів і їх транспортування на ад'юстаж із швидкістю 0,25 м/с. Конвейєр складається з 196 крюків. Відстань між крюками 2,4 м, довжина конвейєра 216,8 м, привод від електродвигуна 30кВт, 725 об/хв. По крюковому конвейєру бунти, охолоджуючись, транспортуються до пакетировщиків, де знімаються і укладаються в пакети.

Пакетировочні машини складаються з механізму скидання і механізму пакетування. Швидкість штовхання бунту 0,25 м/с, зусилля - 30 кН. Привод від електродвигуна 12кВт, 760 об/хв, зкидувач приводиться від електродвигуна 3,5-кВт, 905 об/хв. Пакети бунтів електромостовим краном зі скобою перевозять в корзини на склад готової продукції.

На стані передбачено автоматичне включення летючих ножиць для обрізу переднього кінця з витримкою, вимірювання площі поперечного перетину прокатуваного металу в потоці, безперервне вимірювання петлі з метою її автоматичного регулювання, вимірювання натягнення прокатуваного металу між суміжними клітями, відбраковка заготовок в потоці перед нагрівальними печами по довжині і кривизні, вимірювання зусилля прокатки, швидкості обертання електродвигунів головних приводів, контроль проходження переднього кінця прокатуваного металу через чистову групу клітей.

МЕТОДИКА ВИБОРУ ДВИГУНІВ ГОЛОВНОГО ПРИВОДА НЕПЕРЕРВНОГО СТАНА ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ ЛИСТА

Розрахунок головного приводу починають з попереднього вибору двигуна за допомогою діаграми статичних моментів.

Перевірочний розрахунок двигуна на нагрів і перевантажувальну здатність проводиться на підставі швидкісного режиму прокатки і діаграми навантаження з урахуванням динамічних моментів (рис. D.1).

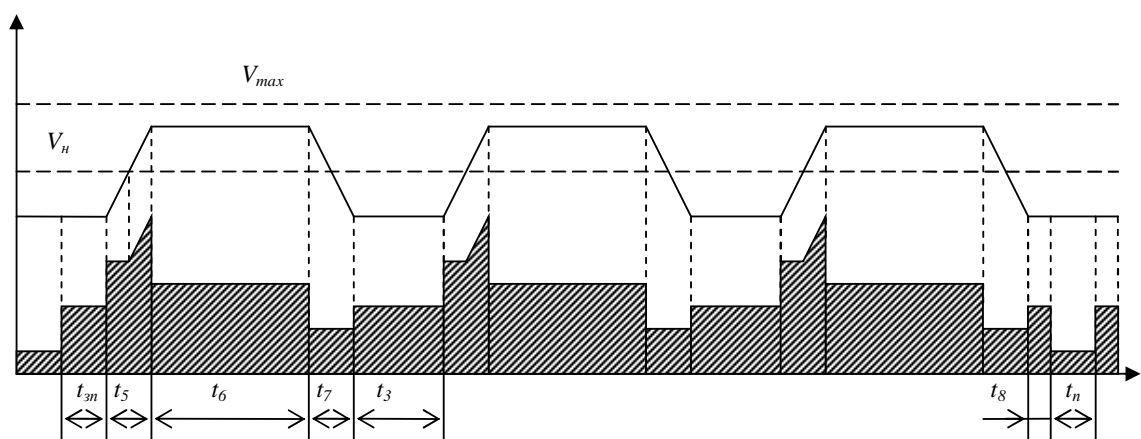


Рис. D.1. Графік швидкостей і моментів головного приводу неперервного стану холодної прокатки

Розрахунок швидкісного режиму прокатки

Розрахунок виконується з урахуванням того, що прокатна смуга складається з трьох рулонів з двома зварними швами.

Прокатка переднього кінця смуги і зварних швів від першої кліті до моталки і заднього кінця смуги ведеться на заправній швидкості.

Час циклу $T_{\text{ц}}$ від початку прокатки одного рулону до початку прокатки наступного рулону

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + 3(t_3 + t_5 + t_6 + t_7) + t_4 + t_8,$$

де t_1 – час установки рулону на розмотувач;

t_2 – час захоплення переднього кінця смуги і подача його в першу кліть;

t_3 – час проходження переднього кінця смуги і зварних швів від першої кліті до моталки на заправній швидкості;

t_4 – час закріплення переднього кінця рулону в моталці;

t_5 – час розгону приводу до робочої швидкості;
 t_6 – час прокатки на робочій швидкості;
 t_7 – час гальмування приводу з робочої швидкості до заправної;
 t_8 – час прокатки заднього кінця смуги на заправній швидкості;
 t_9 – час зняття рулону з барабана моталки. Ця операція співпадає в часі з установкою рулону на розмотувач і захопленням переднього кінця смуги;
 $(t_1+t_2)>t_9$, тому час t_9 не входить в час циклу.

Час проходження переднього кінця смуги і зварних швів на заправній швидкості від першої кліті до моталки визначають по формулі

$$t_{3i} = L_{12}/V_{31} + L_{23}/V_{32} + L_{34}/V_{33} + L_{4M}/V_{34} + t_4,$$

де L_{12} , L_{23} , L_{34} – відстань між клітями, м;

L_{4M} – відстань між останньою кліттю і моталкою, м;

V_{31} , V_{32} , V_{33} , V_{34} – заправні швидкості клітей, м/с.

Заправні швидкості кожної кліті визначають виходячи з умови постійності секундних об'ємів металу у всіх клітях, при відомій заправній швидкості останньої кліті V_{34} :

Час закріплення кінця рулону в моталці

$$t_4 = \pi D_B k / V_{34}$$

де D_B – діаметр барабана моталки, м;

k – кількість витків, необхідних для закріплення кінця смуги на барабані моталки.

Після закріплення кінця рулону на барабані моталки привод всіх клітей розгониться до робочої швидкості з прискоренням a . Перед проходженням зварних швів привід сповільнюється до заправної швидкості, а після проходження шва знову розгониться до робочої швидкості.

Прискорення, уповільнення і робочу швидкість привода решти клітей визначають на підставі рівності секундних об'ємів металу у всіх клітях.

Час розгону приводу до робочої швидкості

$$t_5 = (V_{pi} - V_{3i}) / a_i$$

де V_{pi} , V_{3i} , a_i – робоча і заправна швидкості, прискорення привода i -ї кліті.

Час гальмування приводу з робочої швидкості

$$t_7 = (V_{pi} - V_{3i}) / b_i$$

де b_i – уповільнення привода i -ї кліті.

Час прокатки на постійній робочій швидкості

$$t_6 = l_{6i} / (3V_{pi}),$$

де l_{6i} – довжина смуги після i -ї кліті, що прокатана на робочій швидкості V_{pi} .

Величину l_{6i} визначають по формулі

$$l_{6i} = l_i [3(l_{3i} + l_{5i} + l_{7i}) + l_{8i}], \text{ м.}$$

Загальна довжина смуги на виході i -тої кліті

$$l_i = 3m / (\gamma h_i b_i),$$

де m – маса одного рулону, т;

γ – густина металу, т/м³ ;

h_i, b_i – товщина і ширина смуги, м.

Довжина смуги, що прокатана при розгоні привода

$$l_{5i} = (V_{3i} + V_{pi}) t_{5/2}, \text{ м.}$$

Довжина смуги, що прокатана при уповільненні привода

$$l_{7i} = (V_{pi} + V_{3i}) t_{7/2}, \text{ м.}$$

Довжина заднього кінця смуги, прокатаного в i -й кліті на заправній швидкості (для прикладу $i=2$)

$$l_{82} = L_{p1} \cdot h_0/h_2 + L_{12} \cdot h_1/h_2, \text{ м}$$

де L_{p1} – відстань між розмотувачем і першою кліткою, м.

Час прокатки заднього кінця смуги

$$t_8 = l_8 / V_{3i}, \text{ с.}$$

Час паузи $t_n = t_1 + t_2$, с.

Розрахунок діаграми навантаження

На неперервних станах холодного прокатки процес прокатки ведуть з натягом. На смугу з боку входу металу у валки діє задній натяг, а з боку виходу металу з валків діє передній натяг. Тому момент прокатки на цих станах визначають по формулі

$$M_{np} = M_0 - T_n D_p / 2 + T_3 D_p / 2, \text{ Нм}$$

де M_0 – момент вільної прокатки і сил тертя, Нм;

T_3 – задній натяг, Н;

T_n – передній натяг, Н;

Обертаючий момент двигуна головного приводу стану холодного прокатки в загальному випадку складається з трьох складових

$$M = M_{np} + M_{xx} + M_0$$

де M_{np} – момент прокатки і додаткових сил тертя;

M_{xx} – момент неробочого ходу;

M_0 – динамічний момент.

Момент прокатки і момент неробочого ходу складають статичний момент. Момент прокатки приводять до валу двигуна.

При прокаті на заправній швидкості момент двигуна рівний статичному моменту.

При прискоренні і уповільненні до результуючого моменту додається динамічний момент з відповідним знаком.

При прокатці на швидкості вище за номінальну швидкість двигуна визначають скорегований момент

$$M'_c = M_{cm} (V_p / V_n),$$

$$M'_0 = M_0 (V_p / V_n).$$

Перевірка двигуна за нагрівом

Еквівалентний (середньоквадратичний) момент визначають по діаграмі навантаження моментів за одним із методів еквівалентних величин (струмів, моментів, потужностей).

Для ділянок діаграми, де момент змінюється по лінійному закону, використовують формулу еквівалентизації до прямокутника.

Визначають номінальний момент двигуна M_n за паспортними даними і порівнюють з еквівалентним.

Перевірка двигуна на перевантажувальну здатність

З діаграми навантаження вибирають максимальний момент двигуна M_{max} і порівнюють із номінальним. Отримане відношення не повинне перевищувати перевантажувальної здатності двигуна, узятої з паспортних даних при швидкості від нуля до номінальної. Якщо перевантаження двигуна виявиться більше, то слід зменшити робочу швидкість або прискорення привода.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. АСУ листопркатных станов. Архангельский В.И., Богаенко И.Н., Васичкин В.И. и др. М.: Металлургия, 1994. 334 с.
2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для ВУЗов. – Л.: Энергоиздат. Ленинградское отд-ние, 1982.—392 с., ил.
3. Бригиневиц Б.В., Голованов А.К. Наладка тиристорных электроприводов с раздельным управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1991 – 152 с.: ил.
4. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., "Высш. школа", 1977
5. Зеленев А.Б. Выбор мощности электропривода механизмов прокатных станов. Учеб. пособие для вузов. – К.: УМК ВО, 1990. – 200 с.
6. Ісаєв М.Г. Грабовський Г.Г. Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів – К.: Техніка, 2001. – 248 с.
7. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.: ил.
8. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник/ И.Х. Евзоров, А.С. Горобец, Б.И. Мошкович и др.; Под ред. канд. техн. наук В.М. Перельмутера. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.: ил.
9. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. – Х.: Основа, 2004 – 210 с.
10. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с., ил.
11. Півняк Г.Г., Бешта О.С. Тулуб С.Б. Цифрова ідентифікація параметрів електромеханічних систем в задачах енерго- і ресурсозбереження: Монографія/ За ред. акад. Г.Г.Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2004. – 197 с.
12. Решмин Б.И., Ямпольский Д.С. Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов. М., "Энергия", 1975. – 184 с.
13. Тиристорные электроприводы прокатных станов / В.М. Перельмутер, Ю.Н. Брауде, Д.Я. Перчик, М.М. Книгин. Металлургия, 1978. – 152 с.: ил.